



Maria Luísa de Melo Madeiras Pires Pereira

Licenciada em Geologia

Caracterização geotécnica de rochas vulcânicas de Lisboa – um contributo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica

Orientador: Ana Paula Fernandes da Silva, Prof.^a Auxiliar FCT NOVA

Co-orientador: Maria Isabel Gonçalves Fernandes, Prof.^a Auxiliar, FCUL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José António de Almeida, Prof. Associado FCT NOVA e GeoBioTec

Arguente: Investigador Coordenador Aposentado Nuno Feodor Grossmann

Vogal: Prof.^a Doutora Paula F. da Silva, Prof.^a Auxiliar FCT NOVA e GeoBioTec



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2018



Maria Luísa de Melo Madeiras Pires Pereira

Licenciada em Geologia

Caracterização geotécnica de rochas vulcânicas de Lisboa – um contributo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Geológica

Orientador: Ana Paula Fernandes da Silva, Prof.^a Auxiliar
FCT- UNL

Co-orientador: Maria Isabel Gonçalves Fernandes, Prof.^a
Auxiliar, FCUL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José António de Almeida, Prof. Associado FCT
NOVA e GeoBioTec

Arguente: Investigador Coordenador Aposentado Nuno Feodor Grossmann

Vogal: Prof.^a Doutora Paula F. da Silva, Prof.^a Auxiliar FCT NOVA e
GeoBioTec



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2018

Caracterização geotécnica de basaltos de Lisboa – um contributo

Copyright@ Maria Luísa Pereira 2018

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e a de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu avô, João Amâncio Pereira

Que não estando sempre esteve

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho envolveu o contributo de muitos aos quais pretendo expressar os meus sinceros agradecimentos.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, em particular ao Departamento de Ciências da Terra, que me forneceu os laboratórios e os equipamentos necessários para a elaboração desta tese.

À minha orientadora, Professora Ana Paula Silva, e à minha co-orientadora, Professora Isabel Fernandes, por terem contribuído, enquanto Professoras de Mecânica das Rochas, para o meu gosto pela área e por terem possibilitado a realização desta dissertação através do fornecimento de material bibliográfico, apoio nos ensaios laboratoriais, no campo e nas revisões feitas.

Ao Professor Pedro Lamas, pela ajuda no laboratório de Geologia de Engenharia e com a caroteadora. Ao Professor José António Almeida, pela formação de geoestática e pelo esclarecimento de dúvidas nas mais diversas questões. Ao Professor Joaquim Simão, que me possibilitou o uso dos microscópios electrónicos e pelo apoio na fotografia às lâminas. Ao Professor Nuno Leal, pela ajuda e pelos conselhos na análise petrográfica. Ao Professor Carlos Chastre Rodrigues, por possibilitar o uso da prensa do Departamento de Civil da FCT-UNL e pelo seu contributo para o tratamento de dados. Agradeço o apoio técnico fornecido pelo Engenheiro Vítor Silva, pelo Jorge Silverio e pela Eduarda Ferreira nos diversos trabalhos práticos. À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, na pessoa da Doutora Cytia Mourão, pela execução das lâminas delgadas. Ao Metropolitano de Lisboa, que forneceu os tarolos de sondagem à FCT e à FCUL que serviram de base a esta tese.

Por último agradeço à minha família que tanto me apoiou nesta etapa, em particular aos meus pais, à minha irmã, ao meu cunhado e ao meu patudo Loki. Agradeço aos meus amigos que me acompanharam neste processo, sabendo eles quem são por não se terem escapado aos meus desabafos. À Patrícia e à Madalena, como sempre presentes, na tese e fora dela; aos meus amigos da FCT, em particular à Lúcia e ao Andrei; ao Jorge pela sua mestria em Photoshop e aos meus companheiros(as) de café: Varandas, Inês, Carolina, Amaro e Maria. Ao Hugo pela ajuda prestada na preparação dos provetes.

RESUMO

O Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL) materializa a actividade ígnea que afecta a Bacia Lusitaniana, tendo uma idade de 72 Ma e cuja formação é síncrona à abertura do Oceano Atlântico. Os basaltos são as rochas predominantes e têm textura e composição variáveis. Dada a vasta extensão deste complexo, manifestando-se na Grande Lisboa e seus arredores, e pelo facto de ser interceptado por diversas obras e outras que o possam vir a interessar, o seu estudo geotécnico é importante, visto a informação ser escassa nessa vertente contrariamente aos estudos petrográficos e geoquímicos já disponíveis.

Desta forma, a dissertação integra como parte predominante um estudo de rocha intacta que envolve um total de sete amostras de basaltos, algumas com graus de alteração e fracturação distintos, e que advêm de cinco localizações diferentes. São preconizados ensaios não destrutivos (peso e massa volúmica e porosidade aberta, resistência ao ressalto e velocidade de propagação de ultrassons) e ensaios destrutivos (resistência à compressão uniaxial e índice de compressão pontual e ensaio de tracção brasileiro) que visam concluir sobre as propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas destes materiais. Os resultados são concordantes com aqueles definidos na literatura. Contudo, as correlações pré-estabelecidas não podem ser aplicadas no CVL, pois restringem-se aos basaltos que lhes deram a origem ou a outros semelhantes. Perante isto, propõem-se novas correlações estatísticas entre várias propriedades índice que podem ser aplicadas em estudos futuros que envolvam os basaltos deste complexo.

Complementarmente, como qualquer estudo geotécnico inclui, para além da análise da rocha intacta, uma avaliação do maciço rochoso, faz-se a caracterização de uma escavação em maciço basáltico na Pedreira Moita da Ladra, em Vila Franca de Xira. Neste observa-se um forte condicionamento na qualidade da rocha pelas descontinuidades e conclui-se que os sistemas VRFSR e VRS utilizados são os mais apropriados para avaliar, geomecanicamente, os afloramentos do CVL.

Palavras-chave: Complexo Vulcânico de Lisboa, basaltos, caracterização geotécnica, rocha intacta

ABSTRACT

The Volcanic Complex of Lisbon (CVL) reflects the igneous activity affecting the Lusitanian Basin. It is 72 Ma old and its formation is synchronous to the opening of the Atlantic Ocean. Basalts are the predominant rocks and have variable texture and composition. Given the vast extent of this complex (that covers Lisbon and its surroundings) and the settlement of present and future engineering works on it, its geotechnical study is important. Furthermore, this type of information is scarce in comparison to petrographic and geochemical studies already available.

From this perspective, the dissertation integrates, as a predominant part, an intact rock study. This involves a total of seven samples of basalts, some with different degrees of alteration and fracturing. In addition, they are collected from five distinct locations. Non-destructive tests (water content, porosity, density and related properties, rebound hardness and ultrasound velocity) and destructive tests (compressive strength, indirect tensile strength and point load strength index) were conducted to characterize the physical, mechanical and dynamic properties of these rocks. The results agree with those defined in the literature. However, pre-established correlations cannot be applied to CVL material, because they are restricted to the basalts they refer to or similar ones. Due to this, some new correlations are presented between some index properties. Those can be applied in future studies involving basalts of this complex, or similar rocks.

In addition, as any geotechnical study contemplating an intact rock analysis, it must include also an evaluation of the rock mass, a cut in basalts at Moita da Ladra Quarry, in Vila Franca de Xira, is characterized. It is observed that the discontinuities strongly influence the rock quality. On the other hand, it is concluded that VRFSR and VRS classification systems are the most suitable to describe the geomechanics of CVL outcrops.

Keywords: Volcanic Complex of Lisbon, basalt, geotechnical characterization, intact rock

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ENQUADRAMENTO.....	1
1.2	OBJECTIVOS E METODOLOGIA.....	1
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	ESTADO DE ARTE.....	5
2.1	ROCHAS VULCÂNICAS.....	5
2.1.1	<i>Classificação das rochas ígneas.....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Basaltos.....</i>	<i>11</i>
2.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	14
2.2.1	<i>Conceitos – Maciço rochoso e Rocha intacta.....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Classificações geotécnicas.....</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Amostragem e representatividade.....</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Propriedades geotécnicas da rocha intacta.....</i>	<i>21</i>
2.3	TRABALHOS PRÉVIOS E RESULTADOS OBTIDOS.....	28
2.3.1	<i>Correlação da descrição micropetrográfica com a caracterização físico-mecânica.....</i>	<i>29</i>
2.3.2	<i>Caracterização da rocha intacta e correlações com parâmetros mecânicos.....</i>	<i>29</i>
3	CASO DE ESTUDO – COMPLEXO VULCÂNICO DE LISBOA.....	39
3.1	ENQUADRAMENTO.....	39
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.2.1	<i>Amostras do CVL.....</i>	<i>46</i>
3.2.2	<i>Ensaio não destrutivo.....</i>	<i>56</i>
3.2.3	<i>Ensaio destrutivo.....</i>	<i>62</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA INTACTA.....	73
4.1.1	<i>Descrição e análise micropetrográfica.....</i>	<i>73</i>
4.1.2	<i>Ensaio não destrutivo.....</i>	<i>82</i>

4.1.3	<i>Ensaios destrutivos</i>	88
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO DE VIALONGA.....	99
4.3	CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS	105
4.3.1	<i>Comparação das características microscópicas com as físicas e mecânicas da rocha intacta...</i>	105
4.3.2	<i>Correlações estatísticas pré-existentes</i>	107
4.3.3	<i>Correlações estatísticas para o CVL</i>	108
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXOS	129
	APÊNDICES	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama do faseamento de estudos adoptado para o estudo geotécnico de basaltos do CVL	2
Figura 2.1 Classificação textural de rochas ígneas: A. Grau de cristalinidade; B. Granularidade; C. Homogeneidade granulométrica (adaptado de Mackenzie <i>et al.</i> , 1982; Winter, 2001)	6
Figura 2.2 Diagramas para análise semi-quantitativa ou estimativa visual da abundância relativa dos constituintes minerais (Best, 2013).....	8
Figura 2.3 Diagrama QAPF das rochas vulcânicas da classificação da IUGS (adaptado de Streckeisen, 1967 <i>apud</i> Palácios & Matos Alves, 2003)	8
Figura 2.4 Classificação química de rochas vulcânicas baseado no diagrama TAS (adaptado de Le Bas <i>et al.</i> , 1986; fonte: http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/igneous_rocks_plate_tectonics.htm).....	9
Figura 2.5 Classificação da IAEF (Dearman <i>et al.</i> , 1979) e de W e F (ISRM, 1978d) de acordo com a BGD ...	10
Figura 2.6 Classificação normativa em função da saturação em SiO ₂ (Yoder & Tilley, 1962)	12
Figura 2.7 Classificação normativa AFM com representação das sub-séries toleítica e calco-alcalina (fonte: http://usgeologymorphology.com/adirondacks-p-gloss.html)	12
Figura 2.8 Sistema VRS (adaptado de Miranda <i>et al.</i> , 2017)	19
Figura 2.9 Tipos e designação da resistência da rocha intacta.....	25
Figura 2.10 Envoltórios de rotura do critério de Hoek & Brown (adaptado de González de Vallejo <i>et al.</i> , 2004)	26
Figura 2.11 Comparação das curvas de tensão-extensão de uma rocha dura e de uma rocha branda (adaptado de Rocha, 1981).....	27
Figura 2.12 Curva teórica tensão-extensão de uma rocha num ensaio de compressão (adaptado de Rocha, 1981)	28
Figura 3.1 Principais ocorrências magmáticas transicionais (2º Ciclo) e alcalinas (3º Ciclo) na Bacia Lusitaniana (Kullberg <i>et al.</i> , 2013)	40
Figura 3.2 Rochas vulcânicas do CVL no diagrama TAS (Palácios, 1985)	41
Figura 3.3 Diagrama resumo dos métodos de estudo utilizados para descrever o material	43
Figura 3.4 Sequência de trabalhos para preparação dos provetes para os ensaios laboratoriais físicos, dinâmicos e mecânicos.....	45
Figura 3.5 Localização do principal ponto de amostragem de BLV	46
Figura 3.6 Sub-amostras de BLV definidas em função do grau de alteração e fracturação.....	47
Figura 3.7 Amostras de mão de BLV. Da direita para a esquerda: BLVI, BLVII.a e BLVII.b	47

Figura 3.8 Localização do ponto de amostragem de BLA.....	48
Figura 3.9 Sub-amostras de BLA definidas em função do grau de alteração e fracturação.....	49
Figura 3.10 Amostras de mão de BLA.....	49
Figura 3.11 Localização do ponto de amostragem de BQ.....	50
Figura 3.12 Aspecto de tarolo e amostra de mão de BQ.....	50
Figura 3.13 Localização do ponto de amostragem de BM.....	51
Figura 3.14 Amostra de mão de BM.....	52
Figura 3.15 Localização do ponto de amostragem de BA.....	52
Figura 3.16 Principais dois tipos texturais dos basaltos de Alcântara amostrados e talisca a partir da qual se realizou a lâmina delgada da amostra.....	53
Figura 3.17 Localização do ponto de amostragem de BV.....	54
Figura 3.18 Secções da superfície de escavação alvo do estudo de campo.....	55
Figura 3.19 Material de laboratório utilizado para a imersão dos fragmentos sob vácuo (esquerda) e para a pesagem hidrostática (direita).....	56
Figura 3.20 Medição das ondas longitudinais e disposição dos transdutores.....	59
Figura 3.21 Medição de ondas transversais e disposição dos transdutores.....	59
Figura 3.22 aspecto da utilização do esclerómetro nas faces dos blocos em laboratório, na vertical e na horizontal.....	60
Figura 3.23 Ábaco para normalizar o valor de R à direcção horizontal.....	61
Figura 3.24 Provetes de basaltos ensaiados no ensaio de RCU.....	63
Figura 3.25 Prensa e LVDTs utilizados no ensaio de RCU.....	63
Figura 3.26 Métodos para obtenção de módulos de Young.....	64
Figura 3.27 Variação da resistência à compressão em função dos planos de xistosidade e fraqueza (González de Vallejo <i>et al.</i> , 2004).....	65
Figura 3.28 Modos de rotura no ensaio RCU (Szwedzicki, 2006).....	66
Figura 3.29 Tipos de testes realizados no ensaio de RCP (adaptado de ISRM, 1985).....	67
Figura 3.30 Provetes de basaltos ensaiados no ensaio de RCP.....	67
Figura 3.31 Equipamento MATEST com capacidade de carregamento de 56 kN.....	68
Figura 3.32 Validade dos testes realizados no ensaio de RCP (adaptado de ISRM, 1985).....	68
Figura 3.33 Modos de rotura observáveis nas rochas basálticas.....	69

Figura 3.34 Amostras testadas no ensaio brasileiro	70
Figura 3.35 Prensa de compressão do departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL.....	71
Figura 3.36 Prensa de compressão do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL.....	71
Figura 3.37 Esquema dos tipos de rotura possíveis para rochas não anisótropas no ensaio de tracção brasileiro (Basu <i>et al</i> , 2013)	72
Figura 4.1 Secções tipo da lâmina delgada de BLVI	74
Figura 4.2 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BLVII.a	74
Figura 4.3 Secções tipo em lâmina delgada de BLVII.b	74
Figura 4.4 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BLV.....	75
Figura 4.5 Secções tipo da lâmina delgada de BLAI	76
Figura 4.6 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BLAII	76
Figura 4.7 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BLA.....	77
Figura 4.8 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BQ.....	78
Figura 4.9 Avaliação semi-quantitativa dos minerais da amostra BQ.....	78
Figura 4.10 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BM	79
Figura 4.11 Avaliação semi-quantitativa dos minerais da amostra BM	80
Figura 4.12 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BA	81
Figura 4.13 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BA.....	81
Figura 4.14 Curvas tensão-extensão obtidas no ensaio RCU	90
Figura 4.15 Comparação dos diversos módulos de elasticidade (estáticos e dinâmicos) entre si e com o valor da resistência à compressão uniaxial para cada provete ensaiado	91
Figura 4.16 Comparação dos diversos coeficientes de Poisson (estático e dinâmico) entre si e com a resistência à compressão uniaxial de cada provete ensaiado	92
Figura 4.17 Projecção das amostras estudadas no ensaio de RCU no diagrama de Deere & Miller (1966)	93
Figura 4.18 Tipos de rotura obtidas nos ensaios de RCU.....	94
Figura 4.19 Tipos de rotura obtidas no ensaio de RCP	96
Figura 4.20 Tipos de rotura obtidas no ensaio de RTB	98
Figura 4.21 Diagramas de isodensidades e rosetas das direcções, em azimutes para as três estações em estudo, com referência das famílias de descontinuidades	100

Figura 4.22 Diagramas de isodensidades e rosetas das direcções, em azimutes para a totalidade das estações em estudo, com referência das famílias de descontinuidades	102
Figura 4.23 Relação das propriedades microscópicas (minerais secundários) e as características físico-mecânicas das amostras do CVL.....	106
Figura 5.1 Amostras analisadas e seu agrupamento segundo o grau de alteração e fracturação	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Características mineralógicas (com respectiva evolução mineral) e geoquímicas e rochas derivadas de diferentes tipos de líquidos basálticos (Matos Alves & Palácios, 2003; adaptado de Winter 2001)	13
Tabela 2.2 Manifestação das séries magmáticas em função do contexto geodinâmico, onde * indica o ambiente tectónico principal (Winter, 2001).....	13
Tabela 2.3 Classificação do grau de meteorização do maciço segundo a ISRM (1981) e para basaltos (Tugrul & Gurpinar, 1997).....	17
Tabela 2.4 Classes de qualidade e instabilização potencial segundo a classificação VRFSR (Singh & Connolly, 2003).....	18
Tabela 2.5 Parâmetros a considerar em maciços lávicos e piroclásticos (Muñiz Menéndez & González-Gallego, 2010).....	19
Tabela 2.6 Propriedades com interesse para estudo da rocha intacta e os ensaios laboratoriais mais comuns para a sua determinação (González de Vallejo <i>et al.</i> , 2004; Hunt, 2005).....	22
Tabela 2.7 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas dos EUA, Grécia e Índia.....	31
Tabela 2.8 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas de África do Sul, Nova Zelândia e Reino Unido.....	32
Tabela 2.9 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas da Turquia	33
Tabela 2.10 Valores de parâmetros físico-mecânicos de algumas rochas vulcânicas de Portugal	35
Tabela 2.11 Valores de parâmetros físico-mecânicos e dinâmicos de rochas vulcânicas das Ilhas Canárias	36
Tabela 2.12 Correlações de parâmetros mecânicos estabelecidas essencialmente para rochas vulcânicas.....	38
Tabela 3.1 Requisitos das normas ASTM e das recomendações da ISRM para o número mínimo de provetes, forma e dimensão para os ensaios laboratoriais de caracterização de rocha intacta	44
Tabela 4.1 Resumo dos resultados de massa volúmica, peso volúmico e porosidade aberta para todas as amostras de basalto.....	82
Tabela 4.2 Amostras que apresentam <i>outliers</i> e os métodos usados para a sua determinação.....	83
Tabela 4.3 Resultados obtidos no ensaio de dureza ao resalto (Q1- primeiro quartil, Q3 – segundo quartil, IQR – <i>inter-quartil range</i>).....	85
Tabela 4.4 Resultados do ensaio para determinação das propriedades dinâmicas de amostras de basalto do CVL	87
Tabela 4.5 Resumo dos resultados do ensaio de RCU: valores de σ_c e do teor em água dos provetes na rotura..	88
Tabela 4.6 Resumo dos resultados dos módulos de Young e do coeficiente de Poisson estáticos.....	89
Tabela 4.7 Resultados obtidos no ensaio de compressão pontual segundo a norma ASTM D5731 (2008).....	95

Tabela 4.8 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção indirecta e valores do teor em água na rotura	97
Tabela 4.9 Descrição dos taludes para cada estação e das características das famílias de discontinuidades presentes	99
Tabela 4.10 Síntese das características das famílias de discontinuidades presentes, considerando a totalidade das estações.....	102
Tabela 4.11 Classificação do CVL com os sistemas geomecânicos RMR, VRS e VRFSR para as três estações em estudo no maciço em que se encontra a Pedreira de Moita da Ladra	103
Tabela 4.12 Classificação do maciço BV segundo os sistemas geomecânicos RMR, VRS e VRFSR para a totalidade das estações.....	104
Tabela 4.13 Correlações empíricas da literatura estabelecidas para basaltos e que se adequam às rochas do CVL	107
Tabela 4.14 Estimação de propriedades mecânicas de resistência em função de propriedades físicas	109
Tabela 4.15 Estimação das propriedades de deformabilidade em função de propriedades físicas.....	110
Tabela 4.16 Estimação de propriedades dinâmicas em função de propriedades físicas	111
Tabela 4.17 Estimação de propriedades mecânicas de resistência por correlações entre si.....	112
Tabela 4.18 Estimação de propriedades de deformabilidade em função das de resistência.....	113
Tabela 4.19 Estimação de propriedades de resistência em função de propriedades dinâmicas.....	114
Tabela 4.20 Estimação do módulo de elasticidade estático através do homólogo dinâmico	114
Tabela 5.1 Valores médios obtidos para os ensaios não destrutivos	117
Tabela 5.2 Valores médios obtidos para os ensaios destrutivos.....	117
Tabela 5.3 Correlações estatísticas para os basaltos do CVL	119

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BGD – Basic Geotechnical Description

BS EN – British Standard European Norm

CV – Coeficiente de variação

CVL – Complexo Vulcânico de Lisboa

DCT – Departamento de Ciências da Terra

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

GSI- Geological Strength Index

IAEG – International Association for Engineering Geology and the Environment

ISRM – International Society for Rock Mechanics

IUGS – International Union of Geological Sciences

JRC – Joint Roughness Coefficient

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

OIB – Ocean Island Basalts

RCP – Resistência à compressão pontual (ensaio)

RCU – Resistência à compressão uniaxial (ensaio)

RTB – Resistência à tracção (ensaio) brasileiro

RMR – Rock Mass Rating

SRC – Surface Condition Rating

RQD – Rock Quality Design

VRFSR – Volcanic Rock Face Safety Rating

VRMR – Volcanic Rock Mass Rating

VRS – Volcanic Rock System

Acrónimos

FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

PUNDIT – Portable ultrasonic non-destructive digital indication tester

Abreviaturas

AFM – diagrama com vértices $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e MgO

Asup – área superficial

BA – Basaltos de Alcântara

BLA – Basaltos da Linha Azul

BLV – Basaltos da Linha Vermelha

BM – Basaltos do Parque Florestal de Monsanto

BQ – Basaltos de Queijas

BV – Basaltos de Vialonga

M – minerais máficos

MR – maciço(s) rochoso(s)

$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – álcalis total

QAPF – diagrama com vértices minerais de sílica (Q), feldspato alcalino (A), plagioclase (P) e feldspatóides (F)

Rr – roughness rating

Rw – weathering rating

Rf – infilling rating

SiO_2 - sílica

TAS- total alkali-silica

wt.% - percentage by weight

Símbolos

Alfabeto latino:

A - área

As – direcção de inclinação

Bs - inclinação

D – diâmetro

D' - espessura da secção entre os pontos de aplicação de carga ou espessura do provete cilíndrico do ensaio axial (ensaio de compressão pontual)

De – índice da forma do provete

E - módulo de elasticidade ou de Young

F – grau de fracturação

F - família de diaclases

FC – factor de correcção

g – aceleração gravítica

G – densidade

h – altura

Is – índice de compressão pontual

Is₅₀ – índice de compressão pontual para teste diametral com provete normalizado com D=50 mm

L - comprimento

m – massa

n – porosidade acessível à água

P - força

R – resistência ao ressalto

t' – espessura

V – volume

Ti – titânio

V_p – velocidade das ondas P

V_s – velocidade das ondas S

w - teor em água

w' – largura (em ensaio RCP)

W – grau de alteração

Alfabeto grego:

γ – peso volúmico

ΔV – extensão volumétrica

ε_1 ; ε_a – extensão axial

ε_3 ; ε_l – extensão lateral

ν – coeficiente de Poisson

ρ – massa volúmica

σ - tensão

σ_c – resistência à compressão uniaxial (grandeza)

σ_t – resistência à tracção (grandeza)

σ_y – tensão de cedência

ϕ - ângulo de atrito interno

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A caracterização de rochas e de maciços rochosos é uma etapa essencial e inicial em qualquer projecto de engenharia já que pretende avaliar o comportamento do terreno e a sua aptidão face às solicitações que lhe são impostas. A Mecânica das Rochas, ou mais propriamente a Mecânica dos Maciços Rochosos, é a ciência que se insere no âmbito da Geotecnia e que se ocupa deste estudo, envolvendo tanto uma componente teórica como prática a diferentes escalas. Nos maciços rochosos é necessário um levantamento de campo que leve à caracterização e respectiva classificação geomecânica. Esta tem como base o estudo das descontinuidades existentes que dão indicações sobre possíveis fenómenos de instabilização. A caracterização geotécnica recorre ainda ao estudo da rocha intacta em laboratório onde se avaliam as propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas do material que integra o maciço. Tudo isto conduz a uma optimização no projecto e na construção de uma dada intervenção de engenharia, civil ou mineira, proporcionando-lhe maior economia e segurança. Com efeito, uma averiguação da qualidade do terreno permite concluir sobre a necessidade de se recorrer a eventuais medidas de reforço e tratamento para evitar acidentes ou incidentes, bem como gastos adicionais, tanto durante a construção como durante a vida útil da intervenção.

O Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL) reflecte a importante actividade ígnea que decorreu no meso-cenozóico e que é síncrona da abertura do Oceano Atlântico. Este ocupa uma vasta área, mais precisamente 200 km², manifestando-se na região da Grande Lisboa e arredores. Contém diversas estruturas geológicas e rochas, sendo composto por escoadas lávicas, que ilustram a predominância de um vulcanismo efusivo, intercaladas por níveis piroclásticos. Os basaltos são o material rochoso predominante neste complexo, apresentando uma variação textural e inserindo-se numa série magmática tipicamente alcalina.

A informação relativa à caracterização geotécnica desses basaltos é escassa, referenciando-se apenas o contributo de Soares *et al.* (2002) para as rochas basálticas no contexto de engenharia e como material de construção. Tendo em conta a importante expressão do CVL na região de Lisboa e as diversas obras de engenharia que o têm interessado e outras que o possam ainda interceptar, a sua caracterização geotécnica é oportuna. A presente dissertação visa dar um contributo nesta vertente, dando maior foco ao estudo das propriedades físico-mecânicas e dinâmicas da rocha intacta, incluindo como material basaltos com diversos graus de alteração e fracturação.

1.2 OBJECTIVOS E METODOLOGIA

A presente dissertação, elaborada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica na FCT-UNL, tem como finalidade contribuir para colmatar as lacunas no conhecimento geotécnico que existe sobre os basaltos do CVL. Incide maioritariamente no estudo da rocha intacta, realizando uma série de ensaios laboratoriais para avaliar as respectivas propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas. Este é complementado por uma descrição micropetrográfica breve para identificar a textura e a mineralogia existente nas várias rochas estudadas. Os resultados obtidos são ainda comparados com os valores para diversos basaltos descritos na literatura, com ênfase nos trabalhos efectuados nos arquipélagos da Madeira, Açores e Canárias, onde predominam basaltos alcalinos formados num contexto de intraplaca, tal como os do CVL, em meio oceânico e continental, respectivamente. Pretende-se ainda verificar

quais as correlações mais adequadas aos basaltos do CVL bem como contribuir com novas relações estatísticas para este material a utilizar na região.

Para concretizar este estudo, utilizam-se tarolos de sondagens obtidos em Lisboa, na zona de S. Sebastião (Linha Vermelha) e Amadora (Linha Vermelha), na sequência de estudos geotécnicos executados para o Metropolitano de Lisboa. Suplementarmente, amostram-se blocos de basalto na zona de Queijas e do Parque Florestal de Monsanto, em afloramentos desta litologia. Na escavação para a construção do Hospital CUF Tejo, em Alcântara, recolhem-se blocos de basalto mais alterados face ao restante material a analisar. Os blocos são em seguida caroteados com diâmetro superior a NX no laboratório de Geologia de Engenharia da FCT-UNL e, juntamente com os restantes tarolos, talhados na serra do laboratório de Geologia da mesma instituição para obtenção de um conjunto de provetes devidamente agrupados de acordo com a litologia, grau de alteração (W) e fracturação (F). Para cada grupo geotécnico definido, é feita uma lâmina delgada representativa nos laboratórios de Geologia da FCUL. As amostras são sujeitas a um conjunto de ensaios laboratoriais de acordo com os procedimentos recomendados pela ISRM e pela ASTM, permitindo um estudo das propriedades geotécnicas de alguns exemplares de rochas vulcânicas daquele complexo.

Adicionalmente, efectua -se um estudo de campo em afloramentos de basaltos do CVL de forma a avaliar a aplicabilidade dos sistemas de classificação geomecânica VRS (Miranda *et al.*, 2017) e VRFSR (Singh & Connolly, 2003), desenvolvidos especificamente para maciços vulcânicos, comparando-os com outros pré-existentes, como o RMR (Bieniawski, 1989). Este estudo é conduzido na Pedreira da Moita da Ladra (Vialonga, Vila Franca de Xira) de onde provém, também, o material estudado por Soares *et al.* (2002). A Figura 1.1 resume a sequência de estudos realizados nesta investigação.

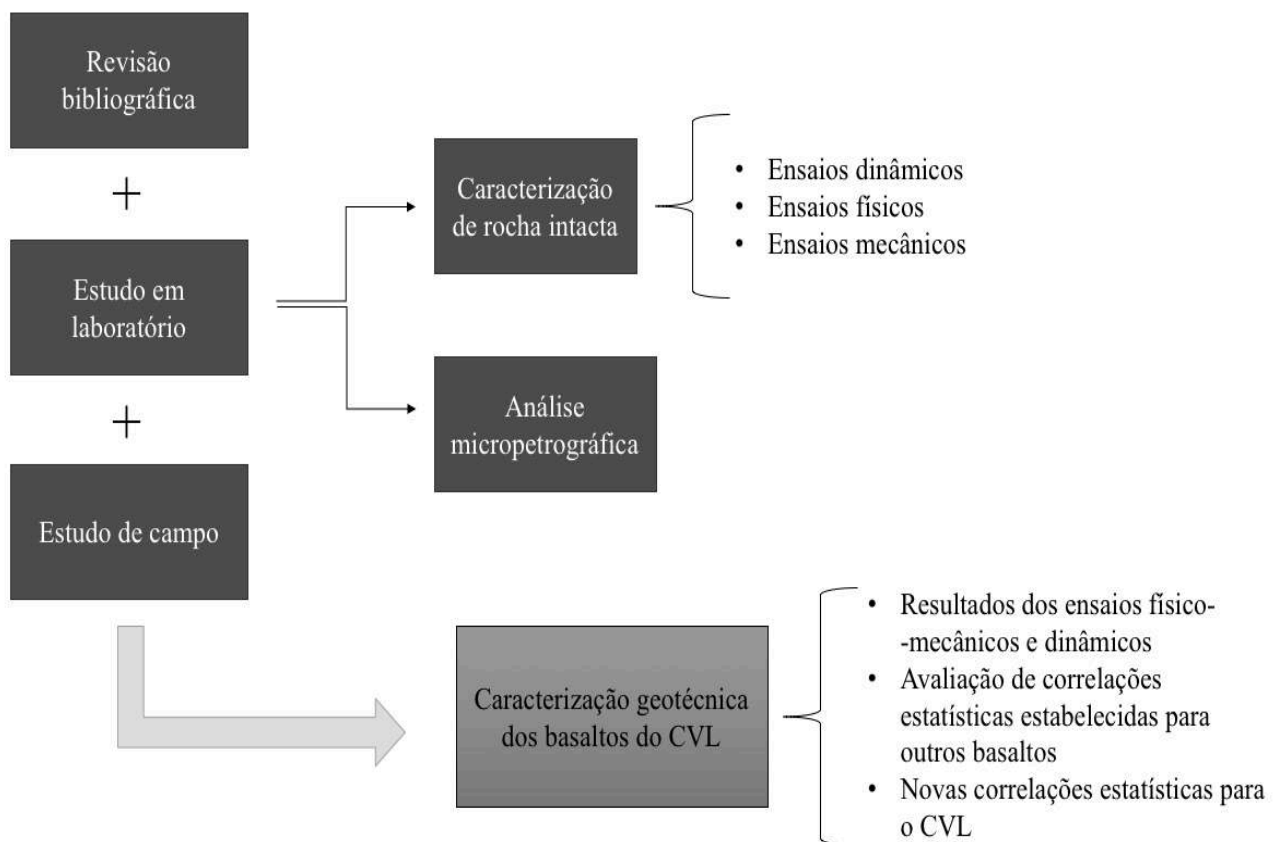


Figura 1.1 Diagrama do faseamento de estudos adoptado para o estudo geotécnico de basaltos do CVL

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo é o introdutório, enquadrando a problemática do estudo realizado nesta dissertação e expondo os objectivos pretendidos com a mesma. Adicionalmente, descreve-se a estrutura do trabalho com referência sumária dos assuntos abordados em cada secção.

O segundo capítulo inclui o estado de arte. Neste reúnem-se os aspectos teóricos referentes às rochas vulcânicas, começando-se por expor as principais classificações utilizadas em Geologia para descrever as rochas ígneas, tomando sempre em ênfase as de natureza extrusiva, nomeadamente os basaltos. Esta sub-secção tem especial relevância para a descrição macroscópica e microscópica das amostras. Posteriormente, destina-se uma secção à caracterização geotécnica, aspecto fulcral no estudo de rocha intacta. Aqui são expostos os principais conceitos teóricos e a metodologia de trabalhos executados para a descrição geotécnica de maciços e de rochas em laboratório. Este capítulo, primeiramente de carácter mais generalista, culmina nos resultados de diversos estudos geotécnicos executados em basaltos em todo o mundo.

No terceiro capítulo é exposto o caso de estudo. Este inicia-se com o enquadramento geológico e com a referência da bibliografia mais relevante acerca do CVL. Segue-se a descrição dos materiais analisados, onde são diferenciados grupos geotécnicos em função do grau de alteração e da fracturação. Para cada amostra seleccionada é feita a descrição micropetrográfica, etapa essencial para aprofundar o conhecimento destes basaltos. Complementarmente, é incorporado neste capítulo a descrição de campo referente ao afloramento da Pedreira de Moita da Ladra, em Vila Franca de Xira, cujos basaltos foram previamente estudados em laboratório. O capítulo é finalizado com a descrição dos ensaios não destrutivos e destrutivos que servem de base à caracterização geotécnica da rocha intacta.

O Capítulo 4 reúne os resultados obtidos e a sua interpretação. Primeiramente, aplicam-se as correlações geomecânicas e conclui-se sobre a qualidade do afloramento vulcânico em estudo. Depois descrevem-se os valores dos ensaios não destrutivos e destrutivos. É realizada uma análise destes e a sua comparação com aqueles mencionados no estado de arte. São, ainda, evidenciadas algumas correlações estatísticas para propriedades geotécnicas previamente estabelecidas que melhor se adequam ao CVL. Esta secção é finalizada com a apresentação de novas correlações potenciais para os basaltos do CVL, complementando o trabalho de Soares *et al.* (2002). Finalmente averigua-se, de forma breve, possíveis pistas que as observações micropetrográficas possam dar sobre as propriedades índice dos materiais em estudo.

No Capítulo 5 são feitas considerações finais e propõem-se possíveis trabalhos a ser realizados futuramente para aprofundar e suplementar o estudo desenvolvido nesta dissertação.

Os Anexos e Apêndices encontram-se no final do presente trabalho, incluindo a descrição detalhada das amostras e os vários resultados obtidos. A sua referência é feita ao longo da dissertação. Os Anexos têm três secções principais: a primeira (A) inclui o material necessário para a caracterização e classificação do maciço basáltico em estudo; a segunda (B) apresenta a ficha para a descrição da amostra de mão e petrográfica baseada na NP EN 12407 (2008) e a terceira (C) as tabelas necessárias à identificação de *outliers* no ensaio de dureza ao ressaltito. Os Apêndices iniciam-se com a secção A onde se apresenta a descrição macroscópica dos provetes destinados aos ensaios laboratoriais, seguindo-se a parte B onde se encontram as fichas descritivas, petrográfica e de amostra de mão, preenchidas. Os ensaios laboratoriais distribuem-se pelo capítulo C no caso dos não destrutivos e pelo capítulo D para os destrutivos. Informação sobre a descrição e classificação geotécnica do maciço de Vialonga pode ser consultada no Apêndice E. Por fim, no Apêndice F apresentam-se os dados relativos às correlações estatísticas entre propriedades índice. Todas as figuras cuja fonte não é especificamente citada são da responsabilidade da autora.

2.1 ROCHAS VULCÂNICAS

Na presente secção salientam-se as diversas classificações aplicadas a rochas ígneas, em particular às vulcânicas, quer na vertente geológica, quer numa vertente geotécnica. Para estas classificações são relevantes a caracterização macroscópica e microscópica de rochas, etapa inicial envolvida em qualquer estudo de rocha intacta. Esta secção finaliza com a apresentação teórica dos basaltos, material alvo deste estudo, introduzindo-os num contexto geológico e geotécnico.

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS ÍGNEAS

As rochas ígneas resultam do processo de arrefecimento e solidificação de magmas, sendo que estes, por sua vez, advêm de processos de fusão parcial. A classificação destas rochas é feita em função da natureza e proporção de constituintes mineralógicos, mas também através do arranjo textural. Estes aspectos reflectem a origem das rochas ígneas, nomeadamente o processo de solidificação e a profundidade a que ocorrem na crosta, considerando-se três sub-grupos principais. As rochas plutónicas ou intrusivas, que geram intrusões plutónicas, cristalizam em profundidade de forma lenta, adquirindo textura granular. As intrusões ígneas são essencialmente influenciadas pela estrutura das rochas encaixantes e pela geologia regional (Bell, 2007). Caso os magmas se associem à actividade vulcânica e solidifiquem à superfície, então as rochas geradas denominam-se por vulcânicas ou extrusivas, tendo uma textura de granulometria mais fina ou mesmo vítrea, dado o rápido arrefecimento. Com efeito, o vulcanismo consiste na manifestação à superfície dos processos de fusão parcial, onde, após a magmatogénese, os líquidos produzidos são expelidos através de erupções. Estas têm um carácter esporádico e descontínuo, podendo ter uma natureza explosiva, efusiva ou mista. No primeiro cenário são produzidos materiais piroclásticos que podem ser projectados para o ar e apresentar-se consolidados ou não. Numa erupção tipicamente efusiva tem-se escoadas lávicas que se associam a rochas vulcânicas (Bell, 2007). Os casos intermédios ocorrem quando o magma cristaliza a pequenas profundidades, originando rochas de características intermédias e denominadas de hipabissais. Estas constituem corpos como diques, filões, lacólitos e filões-camada (soleiras), que podem ter uma natureza máfica a félsica (Palácios & Matos Alves, 2003).

Os critérios de classificação para as rochas ígneas são variados e apresentam-se de seguida, sendo que a classificação textural é a mais frequentemente usada, quer na descrição de rochas macroscopicamente como microscopicamente. Note-se que a descrição micro e macropetrográfica para fins de engenharia visa avaliar quais as características mineralógicas e texturais que têm influência no comportamento físico-mecânico das rochas, sendo uma das fases iniciais em qualquer estudo de rocha intacta e geotécnico.

Classificação textural

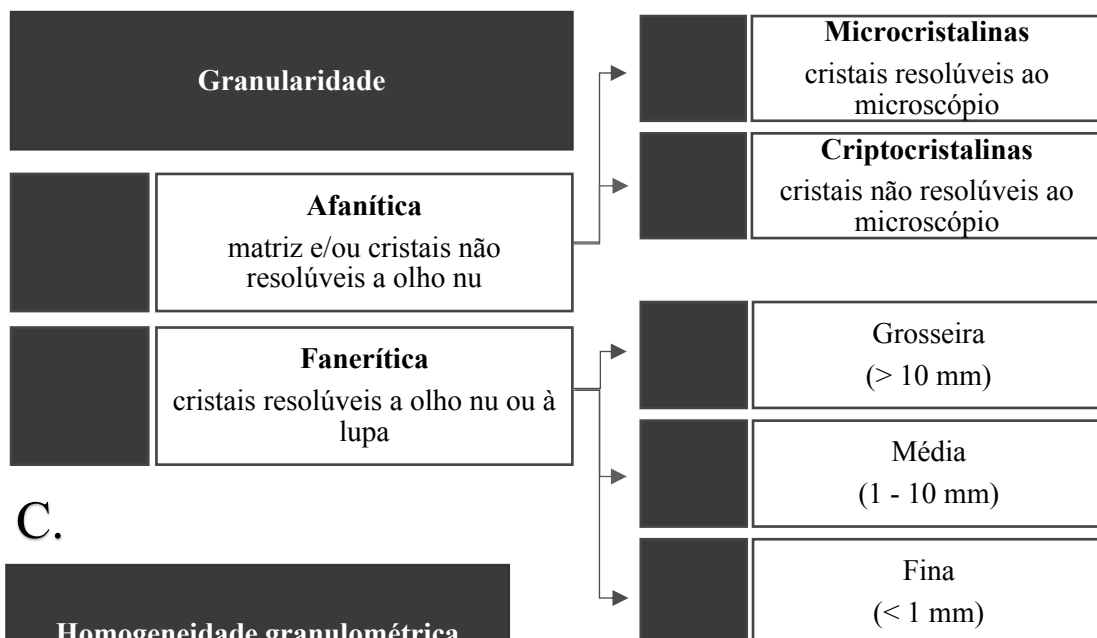
A textura das rochas ígneas reflecte diversos aspectos, tendo-se como exemplo a cinética da cristalização e a ordem pela qual esta se realizou (Mackenzie *et al.*, 1982). Na textura deve-se averiguar o grau de cristalinidade e a granularidade da rocha, bem como a respectiva homogeneidade (Figura 2.1). Os dois primeiros parâmetros a serem avaliados informam sobre a rapidez de cristalização e arrefecimento, que é superior nas rochas vulcânicas, como mencionado. Com efeito, a sua solidificação faz-se em condições superficiais, conduzindo a um padrão textural afanítico ou porfíritico, com grão mais fino do que uma rocha plutónica, estas tipicamente holocristalinas faneríticas e porfíróides. Já a homogeneidade granulométrica transmite a quantidade de estágios que intervieram no processo de arrefecimento, sendo que, por norma, para estas rochas apenas ocorre uma fase de cristalização

materializada pela textura equigranular, enquanto em rochas extrusivas o material passa por dois estágios de arrefecimento: um mais lento e responsável pela geração de fenocristais, e outro mais rápido associado à solidificação da matriz à superfície.

A.

Grau de cristalinidade (proporção vidro-cristais)		
holohialinas quando mais de 90% da rocha é vidro vulcânico	hialocristalinas quando o vidro e os cristais não excedem individualmente 90 %	holocristalinas quando a rocha apresenta mais de 90% de cristais

B.



C.

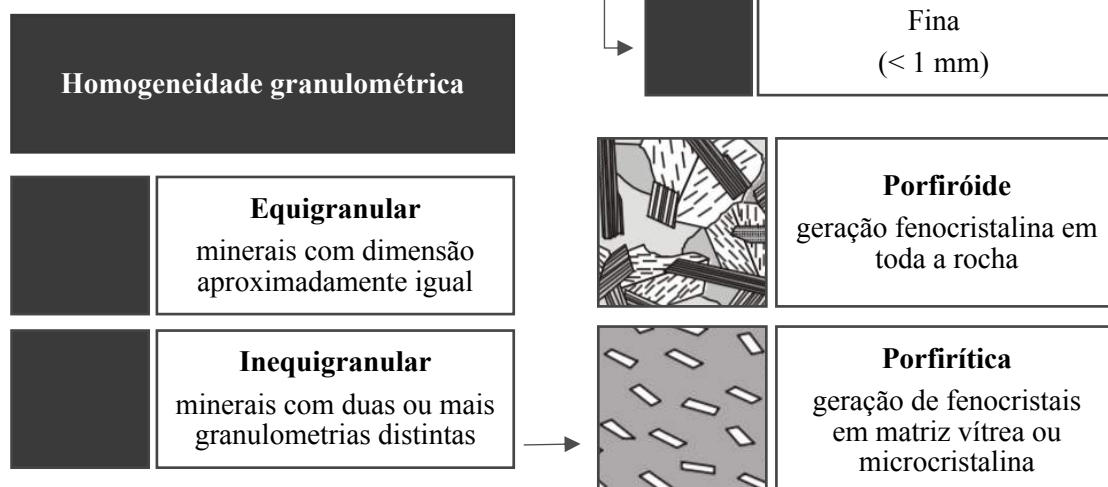


Figura 2.1 Classificação textural de rochas ígneas: A. Grau de cristalinidade; B. Granularidade; C. Homogeneidade granulométrica (adaptado de Mackenzie *et al.*, 1982; Winter, 2001)

Classificação composicional

A mineralogia é um importante indicativo da natureza das rochas ígneas. Os minerais podem agrupar-se de acordo com a sua cor ao microscópio (transparentes, coloridos e opacos) ou de acordo com o seu quimismo, sub-dividindo-se em: máficos, ricos em ferro e magnésio, e félsicos, feldspáticos e com sílica. Os principais constituintes máficos das rochas ígneas são as olivinas, as piroxenas e as anfíbolas. Os minerais félsicos incluem os feldspatos, minerais ricos em sílica, como o quartzo, e, às vezes, micas (Bell, 2007). Estes termos também se aplicam às rochas em si, fazendo a sua classificação em função do tipo de minerais. Com efeito, uma rocha ultramáfica é composta maioritariamente por minerais ultramáficos, uma rocha máfica por minerais máficos e uma rocha félsica por minerais félsicos (Winter, *op. cit.*).

De forma similar, contudo, não equivalente, as rochas podem ser classificadas de acordo com a sua tonalidade recorrendo ao índice de cor que determina a percentagem volumétrica de minerais escuros presentes na rocha. Estes incluem os minerais máficos, opacos e acessórios, e são representados em baixo pela letra **M**. Como tal, as rochas ígneas podem ser classificadas, segundo Le Maitre (2005), em:

- Hololeucocrata: cor clara com predominância de minerais félsicos ($0 < \mathbf{M} < 10\%$);
- Leucocratas; cor clara e predominância de minerais félsicos ($10 < \mathbf{M} < 35\%$);
- Mesocratas: cor intermédia e de composição intermédia resultante de uma mistura de minerais félsicos e máficos ($35 < \mathbf{M} < 65\%$);
- Melanocratas: cor escura e predominância de minerais máficos ($65 < \mathbf{M} < 90\%$);
- Holomelanocratas: cor escura com predominância de minerais máficos ($90 < \mathbf{M} < 100\%$).

Por norma, as rochas máficas tendem a ser melanocratas e as rochas félsicas leucocratas, contudo nem sempre esta relação se aplica, sendo que a cor não pode ser considerada como uma medida fiável da composição da rocha (Winter, *op. cit.*).

A abundância relativa de cada mineral pode ser obtida por uma determinação quantitativa denominada de análise modal, onde se realiza a contagem de pontos correspondentes a cada mineral identificado ao microscópio. Esta é, porém, morosa, sendo que frequentemente se opta pela determinação semi-quantitativa, onde se faz uma observação geral da lâmina e se determinam as percentagens mineralógicas por comparação com uma folha-padrão (Figura 2.2).

Classificação da IUGS

A *International Union of Geological Sciences* (IUGS) propôs uma classificação litológica descritiva quantitativa, baseada na composição mineralógica e na textura, aplicável às mais variadas rochas ígneas. Os diagramas diferem em função da textura, tendo-se uma classificação para as rochas plutónicas (textura fanerítica e $\mathbf{M} < 90\%$) e para as rochas vulcânicas (afaníticas e $\mathbf{M} < 90\%$) - Figura 2.3. Em ambas, a classificação é feita com o diagrama QAPF, correspondendo os vértices, respectivamente, aos minerais de sílica (Q), ao feldspato alcalino (A), à plagioclase (P) e aos feldspatóides (F). A IUGS define ainda diagramas específicos para as rochas gabróicas e ultramáficas, que extravasam o âmbito desta investigação.

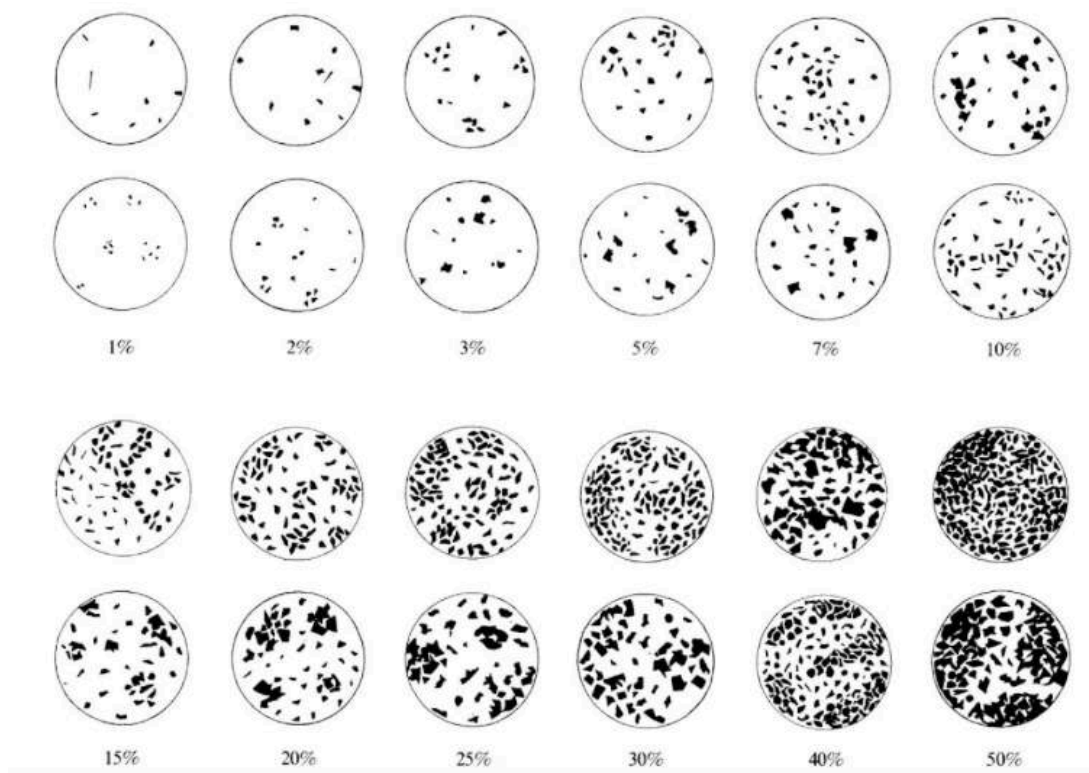


Figura 2.2 Diagramas para análise semi-quantitativa ou estimativa visual da abundância relativa dos constituintes minerais (Best, 2013)

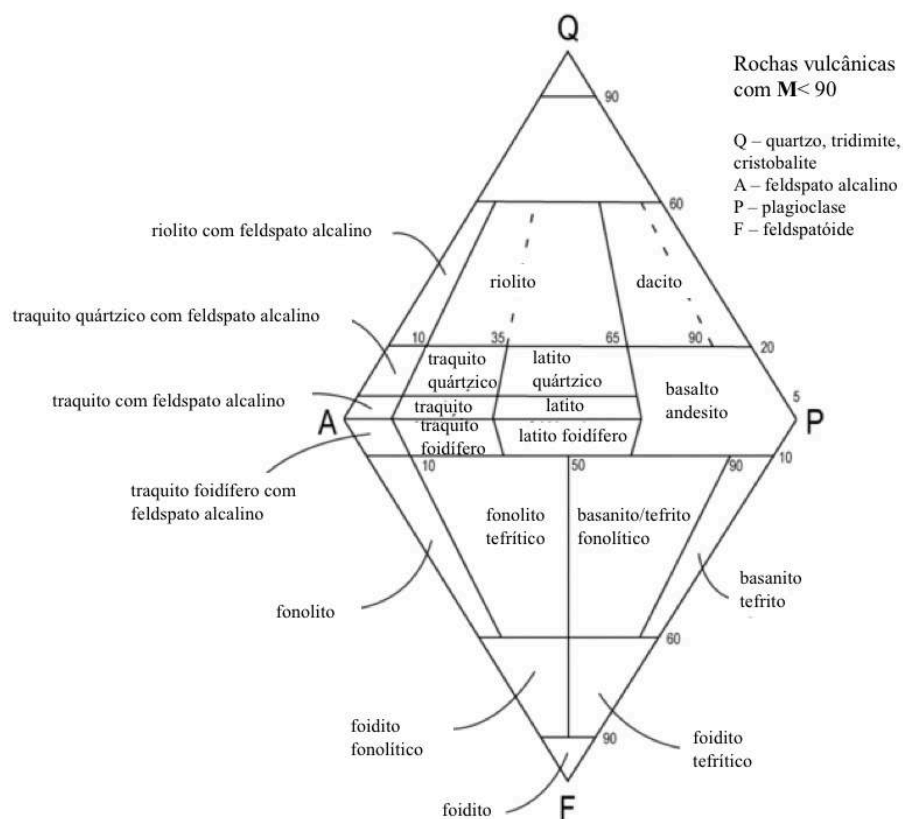


Figura 2.3 Diagrama QAPF das rochas vulcânicas da classificação da IUGS (adaptado de Streckeisen, 1967 *apud* Palácios & Matos Alves, 2003)

Classificação geoquímica

Para as rochas vulcânicas e hipabissais, torna-se difícil fazer a distinção, por exemplo, entre o andesito e o basalto, caindo no mesmo campo do diagrama QAPF. Nestes casos, a IUGS recomenda a diferenciação com base no índice de cor (descrito na classificação composicional) ou no conteúdo em sílica. Com efeito, uma caracterização das rochas pode ser feita em função do seu teor em sílica, sendo esta frequentemente utilizada e descrita por vários autores, tal como Winter (2001):

- Ácidas: > 66 wt. % SiO_2 ;
- Intermédias: 52 - 66 wt. % SiO_2 ;
- Básicas: 45 - 52 wt. % SiO_2 ;
- Ultrabásicas: < 45 wt. % SiO_2 .

Onde wt. % corresponde à percentagem por peso ou massa.

O conteúdo em sílica também se relaciona, em regra, com o índice de cor e com a percentagem em minerais máficos. Isto é, tendencialmente uma rocha máfica é melanocrata e básica, tal como uma rocha félsica é leucocrata e ácida. Porém, esta associação nem sempre é fiável como já referido.

Em alternativa e com carácter mais quantitativo, pode classificar-se as rochas do ponto de vista químico recorrendo ao diagrama TAS (*total alkali-silica*) proposto por Le Bas *et al.* (1986) que relaciona a percentagem total de álcalis com a percentagem de sílica (Figura 2.4). Neste são representadas as diferentes rochas vulcânicas, desde as ultrabásicas às ácidas, com base na sua composição química.

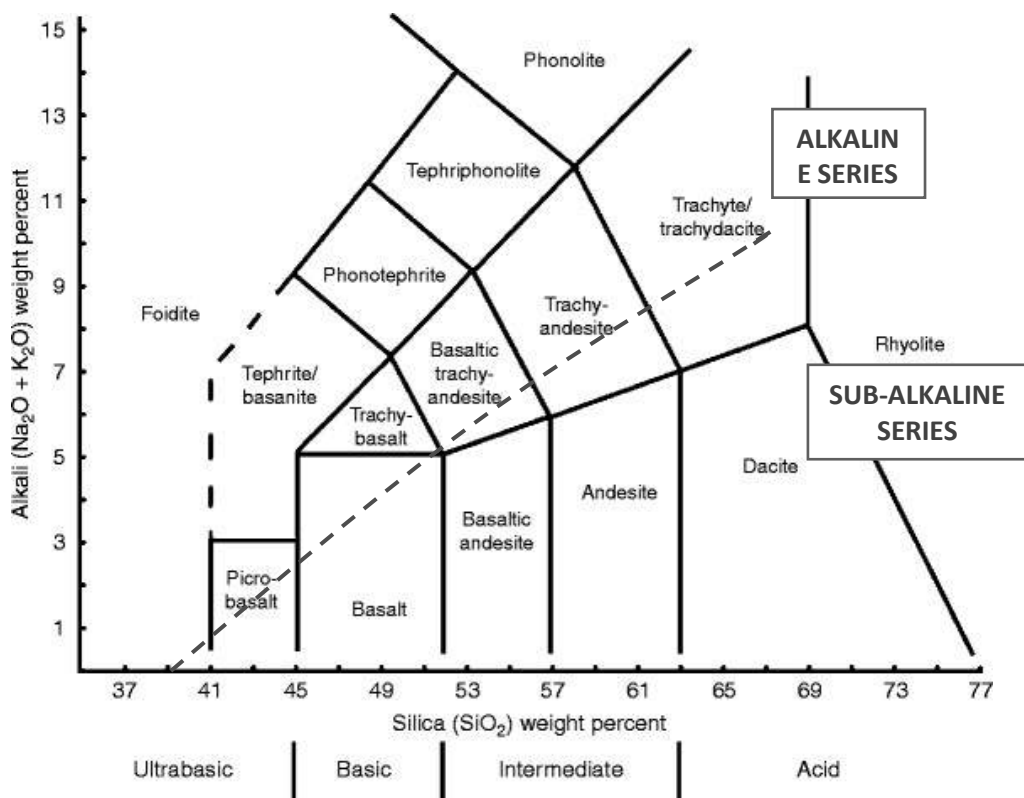


Figura 2.4 Classificação química de rochas vulcânicas baseado no diagrama TAS (adaptado de Le Bas *et al.*, 1986; fonte: http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/igneous_rocks_plate_tectonics.htm)

Classificação da IAEG

Tendo em consideração o comportamento das rochas no âmbito das obras de engenharia e com a finalidade de padronizar a descrição de um maciço rochoso do ponto de vista geotécnico, foi elaborada a *Basic Geotechnical Description* - BGD (Dearman *et al.*, 1979). Esta consiste numa classificação genética que distingue os diferentes tipos de rocha (sedimentar, ígnea, metamórfica) em função da sua estrutura. Por sua vez, dentro de cada grupo, utiliza características como a cor, a textura e a composição mineralógica para designar o tipo de rocha que constitui o maciço. Para fins de engenharia geológica, esta descrição deve ser complementada com a caracterização do grau de alteração e fracturação (ISRM, 1978d). No caso específico das rochas ígneas, estas são maciças e dentro de um grupo, as rochas variam consoante a cor, o teor em sílica e a dimensão granulométrica (Figura 2.5).

Rochas ígneas				Grupo genético		
Maciça				Estrutura comum		
Minerais de cor clara (quartzo, feldspato, ± mica)		Minerais de cor clara e escura	Minerais de cor escura	Composição		
Rochas ácidas	Rochas intermédias	Rochas básicas	Rochas ultrabásicas			
Pegmatito			Piroxenito Peridotito Serpentinito	Grão muito grosseiro	60 2 0,06 0,002	Tamanho do grão (mm)
Granito	Diorito	Gabro		Grão grosseiro		
Microgranito	Microdiorito	Dolerito		Grão médio		
Riolito	Andesito	Basalto		Grão fino		
				Grão muito fino		
Obsidiana				Vítreo Amorfo		
Vidro vulcânico						

Grau de alteração (W)

Grau de fracturação (F)

Figura 2.5 Classificação da IAEG (Dearman *et al.*, 1979) e de W e F (ISRM, 1978d) de acordo com a BGD

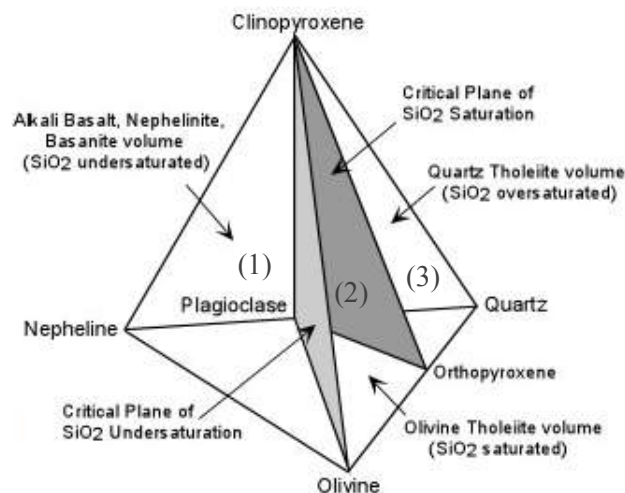
2.1.2 BASALTOS

Os basaltos são rochas com uma ocorrência significativa na superfície terrestre. São formados na sequência da fusão parcial do manto peridotítico e consequente consolidação de magmas de composição basáltica. Correspondem ao equivalente extrusivo dos gabros e noritos e constituem estruturas particulares (escoadas, chaminés, depósitos piroclásticos, etc), associando-se a eventos vulcânicos (Palácios & Matos Alves, 2003).

Macroscopicamente, são rochas de tonalidade escura (melanocráticas), densas, compactas ou vesiculares, afaníticas ou frequentemente porfíricas (Palácios & Matos Alves, 2003). Na sua composição contêm como minerais máficos as piroxenas, óxidos de Ti-Fe e podem incluir ou não olivina. Os minerais máficos rondam uma abundância entre 65 e 90 %. Por outro lado, os minerais fêlsicos consistem em plagioclase, pequenas quantidades de feldspato alcalino, quartzo ou feldspatóides, rondando 10 a 35 % de abundância (*op. cit.*). Note-se que a plagioclase é cálcica (% Anortite > 50%) e por norma ocorre em quantidades iguais à piroxena ou mesmo como a fase mineral predominante (Bell, 2007). Com efeito, frequentemente os basaltos apresentam uma fase fenocristalina de olivina, piroxena e plagioclase, não excedendo 53 wt. % SiO₂ (Allaby, 2013). Os minerais acessórios mais comuns são a espinela, a granada e a apatite.

Demonstram grande variedade textural, sendo esta essencialmente condicionada pela morfologia e pela disposição dos minerais mais abundantes: a piroxena e a plagioclase. Vão desde holocristalinas a pouco cristalinas, podendo ser equigranulares afaníticas ou apresentar-se como porfíricas quando contêm uma geração fenocristalina de piroxena e/ou olivina (Bell, 2007). Existe ainda uma série de texturas especiais que podem ser observadas neste tipo de rocha e que se encontram descritas em Winter (2001).

Os basaltos têm origem em líquidos magmáticos pouco evoluídos que são sujeitos a cristalização fraccionada. Os produtos desta tendem a manter a mesma composição do líquido que lhe deu origem, seguindo, como tal, uma tendência evolutiva coerente. Assim, a categorização de magmas basálticos pode ser realizada em função das séries magmáticas. Estas consistem num grupo de rochas distinguíveis e que partilham características químicas (e mineralógicas) que sugerem uma relação genética entre as rochas mais primitivas e as rochas com maior grau evolutivo (Winter, 2001). Existem diversos diagramas de variação composicional que ilustram as séries, tendo-se como exemplo o tetraedro olivina-nefelina-clinopiroxena-quartzo representado na Figura 2.6. Verifica-se que neste há uma subdivisão volumétrica conforme o conteúdo em sílica e, consequentemente, em função do tipo de basalto. Distinguem-se os basaltos alcalinos como rochas sub-saturadas (campo 1 da Figura 2.6) e os basaltos sub-alcalinos como rochas sobre-saturadas em SiO₂ (campos 2 e 3). Entre eles dispõem-se o plano olivina-plagioclase-clinopiroxena, que materializa uma barreira térmica a baixa pressão. Isto significa que os dois tipos de líquidos basálticos não podem evoluir entre si por diferenciação magmática. A distinção entre basaltos alcalinos e sub-alcalinos também é representada no diagrama TAS (Figura 2.4) sendo que, para uma mesma percentagem de SiO₂, os basaltos alcalinos mostram maior enriquecimento em álcalis total (Na₂O + K₂O) do que os basaltos sub-alcalinos.



- (1) basaltos alcalinos
- (2) basaltos toleíticos olivínicos
- (3) basaltos toleíticos

Figura 2.6 Classificação normativa em função da saturação em SiO_2 (Yoder & Tilley, 1962)

Os basaltos sub-alcalinos podem ser divididos em basaltos toleíticos olivínicos (campo 2 da Figura 2.6), basaltos toleíticos (campo 3 da Figura 2.6) e basaltos calco-alcalinos. Apenas os dois primeiros estão representados na Figura 2.6, já que estes são distinguidos em função do teor em SiO_2 , existindo entre eles o plano clinopiroxena-plagioclase-ortopiroxena que materializa o plano crítico de saturação em sílica. Este separa os basaltos sobre-saturados dos saturados em SiO_2 , sendo possível a evolução de um líquido para o outro. Os basaltos calco-alcalinos diferem dos toleíticos dada a fugacidade em oxigênio. Esta é maior nos primeiros, o que induz uma cristalização precoce de óxidos de ferro e consequente enriquecimento em álcalis (A). Contrariamente, os magmas toleíticos tendem a enriquecer primeiro em ferro, e apenas posteriormente em álcalis. Esta explicação está representada na Figura 2.7 no diagrama AFM, cujos vértices correspondem a $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (A), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (F) e MgO (M), respectivamente.

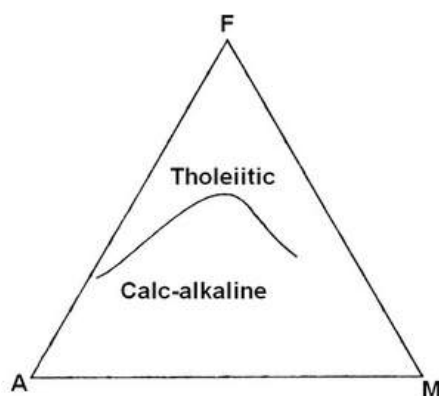
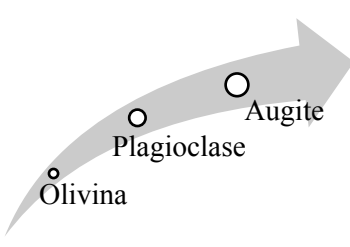
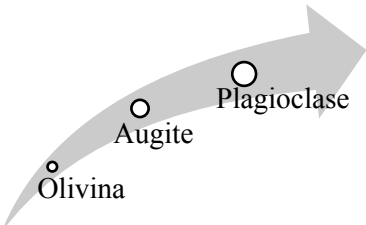


Figura 2.7 Classificação normativa AFM com representação das sub-séries toleítica e calco-alcalina (fonte: <http://usgeologymorphology.com/adirondacks-p-gloss.html>)

As diferenças químicas entre as várias rochas basálticas reflectem-se também na mineralogia distinta que apresentam. Na Tabela 2.1 sintetizam-se as características mineralógicas, mostrando a tendência evolutiva dos minerais e geoquímicas, bem como o tipo de rochas que derivam dos diferentes líquidos basálticos.

Tabela 2.1 Características mineralógicas (com respectiva evolução mineral) e geoquímicas e rochas derivadas de diferentes tipos de líquidos basálticos (Matos Alves & Palácios, 2003; adaptado de Winter 2001)

Basaltos:	Toleíticos	Alcalinos	Calco-alcalinos
Mineralogia	<ul style="list-style-type: none"> - olivina em fenocristais rara - ortopiroxena (comum) e clinopiroxena - vidro (ou quartzo) na matriz - Evolução mineralógica: 	<ul style="list-style-type: none"> - olivina em fenocristais e matriz - clinopiroxena (Ti-augite) - feldspato potássico e/ou nefelina na matriz - Evolução mineralógica: 	<ul style="list-style-type: none"> - fenocristais de anfíbola - plagioclases zonadas
Rochas derivadas	andesitos toleíticos; dacitos; riolitos	havaítos: mugearitos; benmoreitos; traquitos; fonolitos	andesitos; dacitos; riolitos
Elementos maiores	Ricos em SiO ₂	Ricos em álcalis	Ricos em Al ₂ O ₃ e H ₂ O

As séries magmáticas e, consequentemente, os diversos tipos de basaltos inserem-se em ambientes geodinâmicos específicos (Tabela 2.2). Com efeito, as rochas basálticas manifestam-se nas mais variadas áreas geográficas, verificando-se que a sua natureza química e mineralógica depende significativamente do contexto geotectónico a que se associam. A categorização dos basaltos em função do ambiente em que se dá a sua ocorrência é adoptada por uma vasta gama de autores, fazendo-se referência a Winter (2001) e a Juteau & Maury (1999 *apud* Palácios & Matos Alves, 2003).

Tabela 2.2 Manifestação das séries magmáticas em função do contexto geodinâmico, onde * indica o ambiente tectónico principal (Winter, 2001)

Série Magmática	Bordo de placa		Interior de placa	
	convergente	divergente	oceânica	continental
Alcalina	sim		sim*	sim*
Toleítica	sim	sim*	sim	sim
Calco-alcalina	sim*			

Em particular, os basaltos alcalinos, objecto de estudo desta dissertação, têm uma vasta ocorrência. Manifestam-se em três ambientes geodinâmicos principais, nomeadamente nos bordos de placas, em riftes continentais e em zonas de subducção (nas fases finais do processo), e no interior de placas. No contexto específico de intraplaca, este tipo de basaltos pode ser encontrado tanto em meio continental como em meio oceânico, tendo como origem a actuação de plumas mantélicas (Palácios & Matos Alves, 2003). O CVL é um exemplo da ocorrência de escoadas basálticas alcalinas em cenário continental. Os exemplos em meios oceânicos (OIB- *Ocean Island Basalts*) são vastos, referindo-se as ilhas dos Açores e da Madeira, as Canárias e Cabo Verde (*op. cit.*).

Do ponto de vista de geologia de engenharia, as rochas extrusivas apresentam elevados graus de alteração por meteorização ou por hidrotermalismo, principalmente ao longo das fissuras. Tal conduz à frequente fragmentação segundo estes planos de fraqueza, gerando fragmentos de menor granulometria e, muitas vezes, dando lugar a material argiloso. Note-se que o grau de meteorização de um maciço vulcânico é função das condições climáticas num dado local, influenciando o material residual que se gera, habitualmente o saprólito (Bell, 2007). Adicionalmente, a porosidade, comum nestas rochas e associada à libertação de gases, também é um factor relevante e que condiciona o comportamento geomecânico e físico do material. Os depósitos vulcânicos, nomeadamente os mais antigos, mostram-se adequados para serem usados como fundações em engenharia. No entanto, o material mais recente tende a apresentar complicações relacionadas com potenciais cavidades e com a natureza anisótropa dadas as intercalações de níveis piroclásticos com escoadas lávicas. Além disso, os depósitos vulcânicos mais jovens associam-se a solos fósseis de baixa resistência (*op. cit.*).

Para o caso particular dos basaltos, estes apresentam habitualmente propriedades geomecânicas satisfatórias para fins de engenharia. No entanto, verifica-se que alguns são susceptíveis a uma rápida meteorização que pode resultar em fenómenos de desagregação mecânica. Esta associa-se a episódios repetidos e alternados de hidratação e desidratação, culminando na fracturação e na escamação da superfície rochosa exposta. A abertura de fendas e consequente infiltração de água por estas perpetua o processo de alteração, aumentando não só o grau bem como a taxa de meteorização. Adicionalmente, os minerais primários dos basaltos podem gerar minerais secundários aquando o processo de alteração, sendo na sua maioria argilosos. Tal incrementa o potencial de degradação e de desintegração deste tipo de litologia (*op. cit.*).

2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

2.2.1 CONCEITOS – MACIÇO ROCHOSO E ROCHA INTACTA

A Mecânica das Rochas ocupa-se, em parte, da caracterização de rochas. Estas definem-se como um sólido policristalino contínuo composto por um agregado natural de minerais ou grãos. Por sua vez, fazem parte de um sistema maior, denominado por maciço rochoso (MR), e que consiste num aglomerado de blocos de rochas separados por um conjunto de descontinuidades que influenciam o seu comportamento face às solicitações que sobre ele são exercidas, tornando-o numa massa descontínua (Deere & Miller, 1966).

A descrição dos maciços é função da natureza e da distribuição dos materiais que o constituem, bem como das descontinuidades que o afectam (Bell, 1992). Estas constituem planos de fraqueza que não apresentam qualquer conotação cinemática, contrariamente às falhas. A sua formação deve-se a um conjunto de eventos geológicos que ocorrem num intervalo de tempo e segundo um dado estado de tensão (Hudson & Harrison, 1997), definindo as suas propriedades geométricas e mecânicas. O estudo das descontinuidades no maciço é relevante num contexto de engenharia, pois influenciam a resistência,

a deformabilidade e a permeabilidade daquele. Consequentemente, serão um factor condicionante na estabilidade de qualquer superfície rochosa ou escavação (*op. cit.*). Como tal, deve-se atentar nas características geométricas, nomeadamente a atitude, o espaçamento e a continuidade das diaclases, bem como físicas, isto é, na abertura, no enchimento e na rugosidade e ondulação ao longo da sua superfície. Todas estas propriedades vão influenciar o modo como ocorre a compartimentação do maciço e as suas características mecânicas. Com o objectivo de auxiliar o estudo dos maciços rochosos no campo foram desenvolvidos diversos sistemas de classificação geotécnica e geomecânicas que se baseiam num conjunto de parâmetros chave, atribuindo-lhes uma significância numérica. Fornecem um guia directo e de grande utilidade na engenharia (*op. cit.*). Outro aspecto a ser avaliado nos maciços é o estado de meteorização (W), sendo que este se correlaciona com as diaclases por perpetuarem o fenómeno e aumentarem a taxa de alteração.

O conceito de rocha intacta, referido acima, tem inerente um significado geológico, mas também de engenharia. Com efeito, as suas fracturas não têm uma relevância significativa, sendo o seu comportamento função das características mineralógicas (e químicas), físicas e mecânicas. Estas são o resultado dos eventos geológicos que actuaram aquando a formação do material, mas também posteriormente, condicionando a sua estrutura, mineralogia secundária, grau de alteração e permeabilidade. O seu estudo deve contabilizar o facto de a rocha ser apenas representativa de uma parte do maciço e não da sua totalidade, sendo que uma caracterização geotécnica pormenorizada deve basear-se num levantamento de campo dos MR e na realização de ensaios nas várias amostras recolhidas. Note-se que os estudos da resistência e da deformabilidade fazem-se essencialmente em laboratório, em amostras indeformadas de rochas, pois auxiliam na classificação geotécnica dos MR, fornecem uma medida da “qualidade” da rocha e permitem estimar, por correlações empíricas, certas propriedades fundamentais.

2.2.2 CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS

As classificações geotécnicas auxiliam, tal como antes referido, na descrição de um dado MR, tendo utilidade principalmente nas fases preliminares de um projecto de engenharia. Permitem averiguar se todos os parâmetros foram avaliados, bem como fornecem informação sobre características que permitem estimar a resistência e a deformabilidade do maciço em apreço. Apesar das suas limitações, já que consideram apenas características chave, extrapolando-as para todo o maciço rochoso, mostram-se muito vantajosas na prática. Devem, contudo, ser aplicadas a volumes do maciço que se mostrem homogêneos, podendo subdividir-se em zonas geotécnicas onde tal requisito seja cumprido.

Existem várias classificações, sendo que na sua maioria têm em conta o estado de alteração, bem como o grau de fracturação e as características das diaclases presentes. Em engenharia, o grau de alteração de um maciço influenciará as características mineralógicas, texturais e físicas, influenciando o comportamento mecânico bem como a amplitude de fracturação. Deve-se a processos de hidrotermalismo ou meteorização, contribuindo para a desagregação mecânica da rocha e concentrando-se essencialmente ao nível das fracturas. A classificação tipicamente utilizada para os maciços baseia-se na avaliação qualitativa da desintegração física e na decomposição química de uma rocha outrora sã, sendo recomendada pela IAEG (Anon, 1979a) e pela ISRM (Anon, 1981 *apud* Bell, 1992) - Tabela 2.3. Por outro lado, Tugrul & Gürpınar (1997) propõem, com base em levantamentos de campo, uma classificação do grau de meteorização especificamente para rochas basálticas - Tabela 2.3.

Um dos primeiros sistemas classificativos de maciços rochosos foi proposto por Terzaghi (1946 *apud* Bell, 1992), reconhecendo a importância da alteração e também das descontinuidades no maciço. Por outro lado, para realizar uma estimativa da qualidade do maciço a partir de tarolos de sondagem, foi proposto o índice RQD - *rock quality designation* (Deere, 1989), frequentemente utilizado nas classificações geomecânicas, e que permite ter uma noção do tamanho dos blocos.

A BGD de um MR é recomendada pela ISRM (1981), envolvendo uma descrição geológica simplificada, especificando o estado de alteração, a espessura de eventuais camadas e o espaçamento entre descontinuidades consecutivas e, por último, a resistência à compressão uniaxial (RCU) da rocha intacta, bem como o ângulo de atrito das fracturas (Bell, 1992). Para a sua aplicação pode-se recorrer a levantamentos no afloramento ou à observação de tarolos de sondagem, devendo-se sempre realizar ensaios expeditos para sua complementarização. Se necessário, o MR deve ser dividido em zonas de comportamento homogêneo e a cada uma será aplicada a BGD. Consiste numa descrição geotécnica padronizada e de carácter expedito.

Dentro das classificações geotécnicas, surgem as geomecânicas que auxiliam no estudo de qualquer superfície rochosa de escavação, conciliando parâmetros geométricos e mecânicos do maciço rochoso. Refere-se o sistema RMR - *rock mass rating* (Bieniawski, 1989), usualmente utilizado e que se enquadra no âmbito desta dissertação. Nela avaliam-se as condições do maciço e da rocha intacta, sendo que a cada parâmetro é atribuído um valor numérico. O resultado final permite avaliar a qualidade do maciço através de classes quantitativas, dependendo das características das descontinuidades e da presença de água no maciço.

O GSI - *geological strength index*, é um sistema que pretende estimar a resistência de um maciço para determinadas condições geológicas, sendo que para a sua quantificação é necessário avaliar a estrutura de acordo com a classificação de Terzaghi, bem como a condição das superfícies de descontinuidades. É um método expedito que recorre a ábacos e que não se insere nas classificações geomecânicas. Tem como premissa o facto de um maciço depender das propriedades da rocha intacta, mas também na liberdade que os blocos têm para rodar ou escorregar perante diversas condições de tensão (Hoek *et al.*, 1998; Marinos *et al.*, 2005). Tem uma vasta aplicação e permite obter os parâmetros mecânicos para aplicar o critério de rotura de Hoek & Brown (Hoek *et al.*, 2002) para maciços rochosos.

Tabela 2.3 Classificação do grau de meteorização do maciço segundo a ISRM (1981) e para basaltos (Tugrul & Gurpinar, 1997)

ISRM (1981)				Tugrul & Gurpinar (1997)		
Símbolo	Grau de meteorização (%)	Termo	Descrição	Símbolo	Termo	Descrição
W1	0	São	Não é visível meteorização no material	W1	São	Não é visível meteorização no material. Cor cinzenta escura e difícil de partir
W2	< 25	Pouco alterado	Descoloração indica meteorização da rocha ao longo das principais superfícies de fractura	W2	Rocha alterada	2A. Muito pouco alterado Descoloração ao longo de descontinuidades primárias. Cor cinzenta escura. Divisível ao longo das descontinuidades, contendo 90% de rocha sã
W3	25 – 50	Moderadamente alterado	Menos de metade da rocha mostra-se decomposta e/ou desagrega-se em solo; Rocha sã ou descolorada está presente segundo um padrão descontínuo ou em núcleos			2B. Pouco alterado Descoloração parcial da rocha. Cor cinzenta com laivos arroxeados e mais facilmente quebrada. 70 a 90% de rocha e blocos rodeados de descontinuidades angulares
W4	50 – 75	Muito alterado	Mais de metade da rocha mostra-se decomposta e/ou desagrega-se em solo; Rocha sã ou descolorada está presente segundo um padrão descontínuo ou em núcleos			2C. Moderadamente alterado Descoloração total para cinzento claro com laivos castanhos. Mais facilmente quebrável e anisótropas (padrão descontínuo), com núcleos rochosos com limites arredondados na ordem dos 50 a 70%
W5	> 75	Decompuesto	Maioria do material rocha decompõem-se e/ ou desagrega-se em solo; A estrutura original mantém-se intacta	W3	Rocha e Solo	3A. Muito alterado Desintegração parcial da rocha e facilmente partidas. Cor cinzenta clara com tonalidade vermelha a acastanhada e com núcleos rochosos na ordem dos 20 a 50 %
R	100	Solo residual	Todo o material está decompuesto, sem conservação da estrutura inicial da rocha			3B. Extremamente alterado Desintegração da maior parte do material, desagregando-se com a mão. Cor castanha e com menos de 10% de núcleos rochosos
						3C. Completamente alterado Decomposição completa e/ou desintegração em solo, com raros núcleos de rocha. Cor castanha e estrutura e textura primária preservada
				W4	Solo residual (R)	Conversão completa em solo, sendo que a textura e a estrutura já não se encontram preservadas. Cor castanha escura e, habitualmente, enriquecimento em matéria orgânica no topo

Os maciços vulcânicos incluem níveis de escoadas e depósitos de piroclastos, o que os torna heterogêneos do ponto de vista estrutural e litológico, apresentando descontinuidades de diferentes naturezas, grande variabilidade horizontal e vertical, bem como possíveis cavidades. São materiais cuja complexidade importa na engenharia, sendo que se diferenciam de todos os outros materiais não vulcânicos (González de Vallejo *et al.*, 2008). Dada as suas características particulares e devido à falta de informação divulgada publicamente (Rodríguez-Losada *et al.*, 2007), foram propostos alguns sistemas classificativos. Para tal há que considerar que estes maciços podem ser lávicos, quando compostos por escoadas, ou piroclásticos, quando contém depósitos desta natureza. As características das escoadas lávicas dependem, essencialmente, da composição da lava, da sua temperatura e viscosidade. No caso específico de lavas basálticas, as escoadas mostram grande extensão e menor espessura face a uma lava tipicamente ácida. As rochas que as constituem apresentam uma competência adequada, sendo que a estabilidade do maciço depende principalmente da resistência ao corte das descontinuidades e da presença de cavidades (Muñiz Menéndez & González-Gallego, 2015). As fracturas existentes podem ser divididas de acordo com o processo geológico responsável pela sua génese (González de Vallejo *et al.*, 2007). Designam-se, assim, por descontinuidades com origem térmica (predominantes em escoadas), com origem tectónica, resultantes de estruturas intrusivas (devidas ao contacto entre diferentes formações) ou devido a cavidades. Os depósitos piroclastos têm um comportamento geomecânico que é função da compactação, grau de consolidação entre as partículas e sua imbricação, da resistência intrínseca das partículas e do estado de alteração (Serrano, Olalla & Perucho, 2002 *apud* Muñiz Menéndez & González-Gallego, 2015).

O estudo de maciços vulcânicos implica a sub-divisão litológica destes. Del Potro & Hürlimann (2008) fazem uma proposta de classificação geotécnica em função do tipo de rocha vulcânica segundo quatro categorias: rochas lávicas, brechas autoclásticas, rochas piroclásticas e solos vulcânicos. Para cada uma delas existe uma sub-categorização com base, respectivamente, no grau de meteorização, no grau de consolidação dos depósitos piroclásticos e na coesão dos solos. A classificação de escoadas é feita recorrendo com recurso aos sistemas mais usuais, como o RMR e o GSI. A sua aplicação pode, contudo, levar a diversos erros e tem alguns inconvenientes, principalmente na determinação do RQD perante o tipo de fracturação que se pode observar nos MR deste tipo, e porque o GSI se mostra demasiado simplificado. Além disso, não considera a forma dos blocos nem a presença de vesículas e cavidades (Muñiz Menéndez & González-Gallego, *op. cit.*). Em alternativa, o sistema *Volcanic Rock Face Safety Rating* – VRFSR, foi desenvolvido por Singh & Connolly, (2003) para avaliar a estabilidade de taludes de escavação em rochas vulcânicas do Hawaii. Contabiliza a resistência da rocha intacta, a densidade, o espaçamento e o estado das descontinuidades e a presença de água no maciço, atribuindo-lhe um valor numérico que serve para determinar o parâmetro VRMR (*volcanic rock mass rating*). Ao valor final são aplicadas correcções que permitem determinar o VRFSR (Equação 2.1) e que caracteriza o comportamento e a estabilidade do maciço segundo cinco classes (Tabela 2.4).

$$VRFSR = VRMR + (F1 \times F2 \times F3) + (F4 \times F5 \times F6) \quad (2.1)$$

Onde: *F1* – paralelismo entre a encosta e a direcção de inclinação da diaclase; *F2* – continuidade do pendor da face do talude; *F3* – relação entre o pendor do talude e o ângulo de inclinação da diaclase; *F4* – método de escavação; *F5* – altura de escavação; *F6* – existência de descontinuidades no talude.

Tabela 2.4 Classes de qualidade e instabilização potencial segundo a classificação VRFSR (Singh & Connolly, 2003)

Classe	Valor de VRFSR	Estabilidade prevista
I	80 – 100	Totalmente estável
II	60 – 80	Estável
III	40 – 60	Potencialmente estável; requer medidas parciais de protecção
IV	20 – 40	Instável; requer medidas de protecção
V	0 – 20	Totalmente instável; requer medidas de protecção intensivas

Para maciços constituídos por rochas piroclásticas, as classificações geomecânicas não são apropriadas já que a resistência deste tipo de material não é controlada pelas descontinuidades nem pela resistência da rocha intacta, comportando-se como maciços homogêneos. Na Tabela 2.5, Muñiz Menéndez & González-Gallego (2010) resumem quais os aspectos mais importantes a ter em conta em maciços de natureza vulcânica, nomeadamente lávicos e piroclásticos.

Tabela 2.5 Parâmetros a considerar em maciços lávicos e piroclásticos (Muñiz Menéndez & González-Gallego, 2010)

Maciços lávicos		Maciços piroclásticos	
Parâmetros	Importância	Parâmetros	Importância
Resistência à compressão da rocha intacta	+	Densidade <i>in situ</i>	+++
Tamanho e forma dos blocos	++	Consolidação e imbricação	+++
Índice cavernoso	++	Alteração	++
Características das descontinuidades	+++++	Presença de água	+
Presença de água	+	Descontinuidades	+

Recentemente, Miranda *et al.* (2017) desenvolveram uma classificação geomecânica empírica denominada por VRS - *volcanic rock system*, que é calibrada e correlacionada com o sistema RMR. Usa a informação geomecânica recolhida nos arquipélagos da Macaronésia situados no Oceano Atlântico (Madeira, Canárias e Açores) e são aplicadas técnicas de *data mining* (e explorados diferentes algoritmos) que se mostram actualmente úteis em engenharia geotécnica já que permitem gerar modelos de previsão que têm como base uma relação sistemática entre variáveis. O índice VRS varia entre 0 e 100 e resulta do somatório de seis parâmetros diferentes e quantificáveis (Figura 2.8). Os autores fazem modificações nestes parâmetros face ao RMR, adequando-os especificamente aos maciços vulcânicos. É um sistema recente, pelo que deve ser aplicado com cautela.

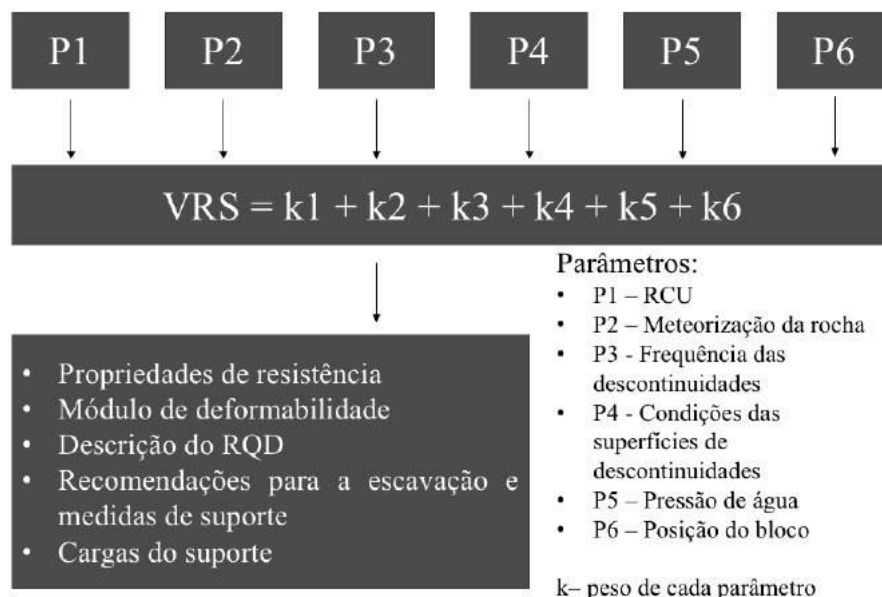


Figura 2.8 Sistema VRS (adaptado de Miranda *et al.*, 2017)

2.2.3 AMOSTRAGEM E REPRESENTATIVIDADE

O estudo geotécnico preliminar de maciços é, em regra, efetuado com base em sistemas classificativos. Estes são expeditos e facilmente aplicáveis apesar das suas limitações, tal como anteriormente referido. A realização de ensaios *in situ* é bastante dispendiosa, sendo que a determinação de propriedades físico-mecânicas é geralmente realizada em laboratório sobre amostras de rocha intacta. O número e o tipo de ensaios são função da finalidade do estudo e são limitados por condicionamentos económicos e pelas normas laboratoriais existentes para o efeito. Estas consistem em recomendações nacionais e internacionais, normalizadas, o que possibilita a comparação e correlação dos resultados obtidos em diferentes laboratórios e amostras. São diversas as vantagens no estudo da rocha intacta, como a maior acessibilidade (física e económica) face aos ensaios de campo e o facto de alguns dos parâmetros determinados integrarem as classificações geomecânicas dos maciços. Em contrapartida, também reúnem uma série de limitações relacionadas com a amostragem e com a representatividade dos resultados (González de Vallejo *et al.*, 2004). As correlações e extrapolações para determinar o comportamento do maciço devem ser feitas, como tal, com precaução e algumas reservas. As várias limitações são de seguida descritas, estando na sua maioria relacionadas com as condições de amostragem, com a natureza e características da rocha e com as condições e procedimentos laboratoriais. Adicionalmente, a sua influência incide maioritariamente nos valores de resistência, à compressão e à tracção.

A representatividade das amostras constitui um dos principais problemas no estudo da rocha intacta. Com efeito, os provetes que são ensaiados correspondem a zonas específicas dos MR, não os representando na sua totalidade e não comportando a variabilidade destes, o que condiciona o seu comportamento. Isto implica a realização de ensaios sobre um número significativo de amostras para que haja representatividade estatística e para melhor aproximar o comportamento do material rocha ao maciço que integra (*op. cit.*). Para cada amostra, os provetes devem apresentar-se segundo um número mínimo recomendado pelas normas, e devem-se agrupar segundo as suas características. Após o processo de amostragem, as condições de transporte e o armazenamento têm influência na representatividade, bem como o modo de preparação de provetes. Tudo isto é especificado em normas, devendo-se seguir as suas recomendações para que os resultados obtidos sejam precisos e seja possível a sua comparação.

As rochas amostradas devem ser descritas e estudadas, pois as suas características têm influência nos resultados, principalmente a heterogeneidade e anisotropia que apresentam e o respectivo teor em água. Para o primeiro aspecto, deve-se atentar na direcção de aplicação do carregamento sobre o provete, pois dada esta característica não há uma distribuição uniforme das tensões aplicadas o que, consequentemente, leva a resultados diferentes (*op. cit.*). Devem ainda ser observadas as fissuras do provete, sendo que para efeitos de ensaios deve-se evitar utilizar aqueles que apresentem fracturas abertas. Por outro lado, o teor em água natural, função da porosidade, também condiciona a resistência, sendo que rochas saturadas apresentam valores menores face às rochas secas (Hudson & Harrison, 1997).

Os restantes problemas estão relacionados com as condições de ensaio (González de Vallejo *et al.*, *op. cit.*), iniciando-se a sua enumeração pelo efeito de escala e pela geometria dos provetes. O primeiro também está presente nos ensaios de campo, porém em menor amplitude, já que estes decorrem directamente sobre o maciço. Por sua vez, o material rocha é apenas representativo de uma parte do maciço em estudo, não contabilizando a sua heterogeneidade e anisotropia, nomeadamente a possível variação estrutural e litológica que pode apresentar e que influencia o seu comportamento geotécnico como um todo. Nas correlações e extrapolações realizadas deve-se sempre contar com este efeito, condicionando de forma significativa a representatividade dos resultados, principalmente os de natureza mecânica. A dimensão, nomeadamente o rácio diâmetro-comprimento, e a geometria dos provetes também deverão ser considerada, principalmente para a determinação da resistência à compressão uniaxial (RCU). A esbeltez dos provetes tem influência neste parâmetro, sendo que quanto mais esbelto for o provete, menor é a resistência. As normas nacionais e internacionais dão

recomendações neste âmbito e para a determinação das propriedades físicas, a dimensão máxima do grão tem especial relevância, exigindo-se que o provete tenha um tamanho dez vezes superior àquela. O módulo de elasticidade mostra-se pouco afectado pelo efeito da geometria, ao contrário da resistência. Neste cenário, procura-se sempre melhorar os procedimentos laboratoriais, adequando-os à geometria dos provetes, ou aplicando correcções de forma (Hudson & Harrison, 1997).

O procedimento laboratorial deve ser cuidadosamente realizado, já que as características do equipamento de ensaio, nomeadamente a sua rigidez e o modo de colocação das amostras neles, têm influência. Outro aspecto relevante é a taxa de carregamento em ensaios para determinação de propriedades mecânicas, onde taxas elevadas conduzem a valores mais elevados de resistência ao contrário de taxas baixas, onde há um amolecimento do provete (Rocha, 1981). Este factor está relacionado com o efeito tempo (*op. cit.*), pois note-se que as rochas são submetidas em laboratório a solicitações em intervalos temporais menores do que aquelas que decorrem em obras geotécnicas. Além disso, um maciço é sujeito a acções geológicas durante um longo espaço temporal, sendo que o seu comportamento real difere do observado em laboratório.

Em último lugar, e também relacionado com as condições dos ensaios, estão os factores ambientais. Eles incluem a temperatura, que também condiciona a resistência: uma rocha sujeita a maior temperatura demonstra menor resistência (*op. cit.*). As condições de pressão a que o ensaio decorre, bem como o teor em água, antes referido, também a condicionam (Hudson & Harrison, 1997).

Termina-se esta secção salientando-se que os ensaios laboratoriais são uma parte essencial num estudo geotécnico. A aplicação de normas e a melhoria dos procedimentos laboratoriais visam a aproximação dos resultados às condições reais. Contudo, a sua mimetização encontra ainda várias barreiras, o que compromete a representatividade dos resultados, devendo-se sempre contabilizar os factores limitativos que têm lugar.

2.2.4 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DA ROCHA INTACTA

Na literatura existe um conjunto vasto de propriedades que podem ser estudadas para fazer uma caracterização geotécnica do material. Destas, verifica-se que as propriedades físicas, também designadas por intrínsecas, juntamente com as propriedades mecânicas são as mais relevantes para esta caracterização (Hunt, 2005). Algumas incluem-se no grupo das propriedades índice que consistem em características chave utilizadas nas classificações geotécnicas ou naquelas que podem servir para obter correlações importantes para fins de engenharia e para a previsão do comportamento do material em estudo. Apresentam, como tal, reprodutibilidade e repetibilidade e possibilitam a resolução de problemas no âmbito da Geotecnia, sendo determinadas de modo simples, económico e expedito (Deere & Miller, 1966). As principais propriedades e os respectivos ensaios para o seu estudo resumem-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Propriedades com interesse para estudo da rocha intacta e os ensaios laboratoriais mais comuns para a sua determinação (González de Vallejo *et al.*, 2004; Hunt, 2005)

Propriedades	Parâmetros de engenharia	Ensaio laboratoriais frequentes
Intrínsecas ou físicas	Teor em água (w)	Determinação do teor em água
	Porosidade (n)	Determinação por métodos de absorção rápida ou pesagem
	Densidade das partículas minerais (G)	Determinação por pesagem e medições com a craveira
	Peso volúmico (γ)	Determinação por técnicas de saturação e pesagem
	Dureza	Ao ressaltado, ao desgaste, à riscagem, etc
Mecânicas	Resistência não confinada (uniaxial)	Resistência à compressão uniaxial ou à carga pontual Resistência à tracção directa ou indirecta (ensaio brasileiro)
	Resistência confinada (triaxial)	Resistência à compressão triaxial
	Módulo de Young ou de elasticidade (E)	Resistência à compressão uniaxial Resistência à compressão triaxial
	Coefficiente de Poisson (ν)	
Dinâmicas	Velocidade de propagação das ondas elásticas (P e /ou S)	Caracterização por ultrassons
Hidráulicas	Condutividade hidráulica	Permeâmetros

A sua descrição é feita por diversos autores, como por exemplo Goodman (1989) ou González de Vallejo *et al.* (2004). Na presente secção faz-se uma referência teórica sumária às propriedades que integram esta investigação. Os ensaios para a sua determinação serão expressos nas secções 3.2.2 e 3.2.3 da dissertação.

Propriedades físicas

O teor em água (w) é obtido através da Equação 2.2. Relaciona-se com a porosidade da rocha (n), nomeadamente quando há uma interconexão entre os poros. Influencia o comportamento mecânico do material, principalmente durante os processos de escavação, onde as condições a que são sujeitas diferem das originais. Tem particular interesse em rochas basálticas muito alteradas, onde os solos que delas derivam apresentam uma expansibilidade importante para o estudo do seu comportamento.

$$w = \frac{n}{G - n \times G} \quad (2.2)$$

Onde: n – (%); G – densidade das partículas minerais (adimensional); w – (%).

A porosidade (Equação 2.3) consiste na relação entre o volume de vazios de uma rocha (V_v) e o seu volume total (V_t), sendo um parâmetro adimensional. Resulta do processo genético e da acção de factores geológicos de natureza física e química. Varia consoante a litologia em causa e depende também da dimensão e da distribuição dos grãos. No caso dos basaltos é predominantemente inerente à sua génese. A porosidade varia de forma contrária com o incremento da pressão e do confinamento actuante nas rochas. Além disso, quanto mais antiga for uma rocha, mais cimentada se encontra, contribuindo para uma menor porosidade. Adicionalmente, a taxa de meteorização também constitui

uma condicionante: quanto maior a exposição de uma rocha aos agentes meteóricos, maior será a sua porosidade. A maioria das rochas ígneas apresenta valores inferiores a 1-2%, sendo que a porosidade se associa em regra a fissuras presentes na rocha. Esta apresenta maiores valores para rochas alteradas e meteorizadas (Goodman, 1989) e também para rochas vulcânicas com carácter vacuolar.

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_{sol}} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde: n – (%); V_v – volume de vazios (m^3); V_{sol} – volume de sólido (m^3).

Este conceito leva a um segundo, denominado de porosidade efectiva (n_e) e que representa a porosidade real da rocha, isto é, aquela em que há uma interconexão entre os poros e permite a circulação de fluidos no material (González de Vallejo *et al.*, 2004).

A porosidade está intimamente relacionada com o peso volúmico e com a massa volúmica de uma rocha, podendo ser determinada a partir destes dois parâmetros. Definem-se como o peso e massa por unidade de volume, respectivamente. A massa volúmica (ρ) e o peso volúmico (γ) (Equação 2.4) dependem da composição mineral, da porosidade presente e do material de preenchimento nos vazios. Correlacionam-se de forma positiva com a profundidade de ocorrência, com a resistência e módulo de deformabilidade da rocha. A meteorização e a porosidade levam a menores valores de γ e ρ , tendo uma correlação negativa. Para rochas basálticas, Goodman (1989) apresenta o valor de 27,1 kN/m³ para o peso volúmico. Este é, porém, muito variável na literatura, como se pode observar na secção 2.3.1.

$$\gamma = \frac{m \times g}{V} = \rho \times g \quad (2.4)$$

Onde: γ - kN/m³; m – massa (kg); g – aceleração da gravidade (m/s²); ρ – massa volúmica (kg/m³); V – volume (m³).

A dureza ao ressalto depende do tipo de material a ser ensaiado, bem como da força de ligação entre os seus constituintes. Não é uma propriedade fundamental, contudo oferece informação quantitativa do comportamento do material. Para a sua determinação recorre-se ao esclerómetro ou martelo de Schmidt, onde actua um espigão que impacta a superfície da rocha, reduzindo a energia elástica necessária para produzir o seu ressalto. Quanto maior a dureza, menor essa absorção e maior é a altura do ressalto que equivale à dureza que a superfície rochosa oferece ao espigão. A área deste é reduzida e, devido à heterogeneidade presente na maioria das rochas, deve-se proceder à realização de um número significativo de medições para se obter um valor médio do número de ressalto, R . Acaba por ser um tipo de medição bastante expedita e que se relaciona com a ordem de grandeza da resistência da rocha intacta, sendo habitualmente considerado como um método aproximado para avaliar essa grandeza.

Propriedades dinâmicas

A velocidade de propagação de ultrassons relaciona-se com as mais variadas propriedades geotécnicas e tem a vantagem de ser determinada num ensaio não destrutivo. A velocidade de propagação das ondas acústicas é, com efeito, dependente da densidade e porosidade da rocha e das suas propriedades elásticas. Também é indicativa do grau de fissuração do provete (Goodman, 1989), sendo que a colmatção ou preenchimento das fissuras leva a valores maiores de velocidade, tal como acontece em rochas mais densas e menos porosas. Em função da dimensão do provete e determinando o tempo que o sinal demora a propagar-se do emissor ao receptor, torna-se possível calcular a velocidade.

A velocidade das ondas de compressão ou longitudinais (V_p) é indicativa da qualidade da rocha já que se correlaciona linearmente com a resistência à compressão uniaxial (σ_c). Mostra valores entre 4 500 e 6 500 m/s para rochas basálticas (González de Vallejo *et al.*, 2004). A velocidade de propagação das ondas de corte ou transversais (V_s) corresponde a cerca de 0,55 a 0,56 de V_p em basaltos (Mavko *et al.*, 2009) e relaciona-se com a resistência e com a deformabilidade do material, possibilitando o cálculo de parâmetros dinâmicos, como o módulo de elasticidade dinâmico - E_d (Equação 2.5), e o coeficiente de Poisson dinâmico - ν_d (Equação 2.6). Estes são, geralmente, superiores (em valor, ν_d é inferior) aos correspondentes módulos estáticos que são obtidos em ensaios de resistência à compressão uniaxial, onde nem sempre se produz um comportamento puramente elástico na rocha (González de Vallejo *et al.*, 2004). O módulo de deformabilidade apresenta uma variação linear com as ondas longitudinais, não se verificando semelhante relação entre as mesmas e o coeficiente de Poisson.

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2.5)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - V_s^2} \quad (2.6)$$

Onde: E_d – Pa; ρ - kg/m³; V_s – m/s; V_p – m/s; ν_d – adimensional

Propriedades mecânicas

A resistência define-se como a tensão limite que uma rocha é capaz de suportar quando submetida a uma dada solicitação e a consequente deformação leva-a à rotura. Permite avaliar a competência e qualidade da rocha. Depende do tipo de litologia, nomeadamente da sua composição e variabilidade mineralógica, bem como do padrão textural e possíveis anisotropias. A granularidade, a distribuição granulométrica e a presença de microfissuras no interior do material também condicionam a resistência da rocha. A coesão (c) e o ângulo de atrito interno (φ) são parâmetros intrínsecos da rocha definidos no ensaio triaxial. Tomam especial interesse na resistência que esta oferece e na sua rotura. Os factores externos à rocha intacta, tal como as condições de ensaio e as condições do ambiente em que decorrem, também influenciam os valores de resistência, tal como referido na secção 2.2.3. Com isto, verifica-se uma grande variabilidade de valores para uma mesma rocha, sendo que este aspecto tem especial relevância em rochas vulcânicas, dada a sua heterogeneidade.

Por outro lado, a fracturação e a rotura de uma rocha consistem na formação de planos de fraqueza com consequente separação do material dada a ocorrência de uma quebra na ligação das respectivas partículas. Perdem-se as forças de coesão e permanecem as forças de atrito. Este processo tende a ocorrer segundo a direcção de aplicação das forças ou então em concordância com a anisotropia e heterogeneidade da rocha (González de Vallejo *et al.*, 2004).

A resistência de uma rocha pode ser classificada ou denominada de diversas maneiras, estando estas expressas na Figura 2.9.

Quanto à deformação	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência de pico (σ_c): valor máximo de resistência que a rocha oferece para uma dada deformação • Resistência residual (σ_n): valor inferior de resistência que ocorre para uma deformação pós-pico
Quanto ao confinamento	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência confinada: combinação de uma compressão axial com uma pressão lateral; determinada num ensaio triaxial • Resistência não confinada: valor de resistência obtido sem a actuação de uma pressão lateral; obtido em ensaios de compressão uniaxial, compressão pontual e resistência à tracção
Quanto ao tipo de rotura	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à tracção: quando a rotura se dá por tracção • Resistência à compressão: quando a rotura se dá por aplicação de uma tensão normal • Resistência ao corte: quando a rotura ocorre por cisalhamento

Figura 2.9 Tipos e designação da resistência da rocha intacta

Nesta dissertação, a resistência à compressão é exclusivamente feita sem confinamento devido a limitações de tempo. Como tal, recorre-se ao ensaio de compressão uniaxial (RCU) e ao ensaio de compressão pontual (RCP). O último tem a vantagem de ser menos exigente quanto à forma dos provetes e na execução do próprio ensaio, sendo muito útil para rochas vulcânicas, principalmente as de qualidade mais fraca, onde é difícil cumprir os requisitos quanto à forma e dimensões exigidos pelas normas de alguns ensaios. Além disso, existem diversas correlações entre o índice de compressão pontual, I_s (Equação 2.7), e a resistência à compressão uniaxial e à tracção, sendo algumas apresentadas na Tabela 2.12, na secção 2.3. É frequente a apresentação dos dados na forma de I_{s50} , variável que representa valor semelhante para um teste diametral e num provete com $D = 50$ mm (Equação 3.15 da secção 3.2.3).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2.7)$$

Onde: I_s – MPa; P – força necessária à fracturação (kN) e D_e – índice da forma do provete (m).

No ensaio de RCU, é aplicada uma força segundo o eixo maior do provete sobre a área superficial do provete, sendo que a resistência à compressão uniaxial (σ_c) vai ser uma tensão que traduz o máximo esforço que a rocha suporta perante a aplicação daquela força axial. O mesmo ocorre para o ensaio de resistência à tracção (σ_t) - Equações 2.8 e 2.9, respectivamente). Habitualmente, neste caso opta-se pelo ensaio de tracção indirecta, ou brasileiro (RTB), por ser mais facilmente exequível do que o ensaio de tracção directa. Com efeito, é exercida uma força de compressão sobre o provete, induzindo-lhe uma rotura por tracção.

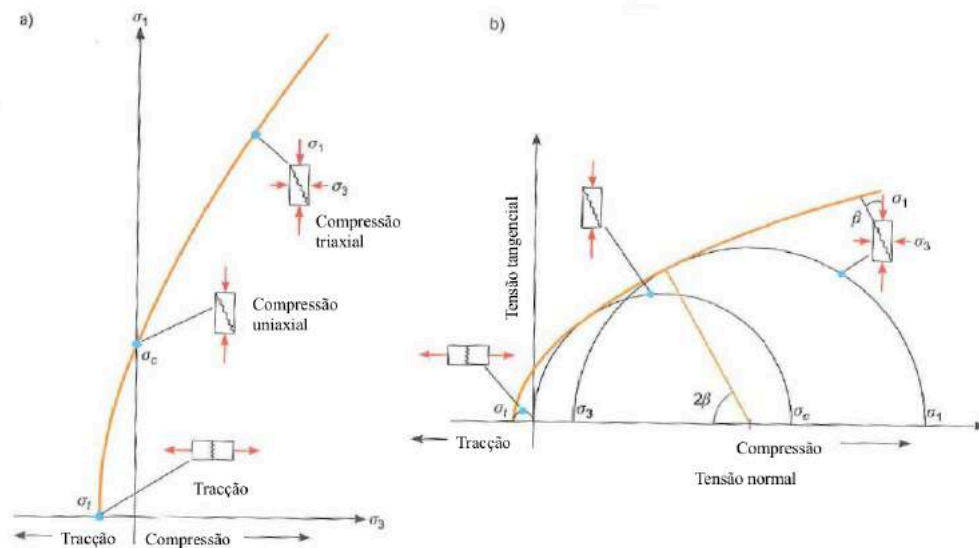
$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.8)$$

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} \quad (2.9)$$

Onde: σ_c – MPa; σ_t – MPa; F_c – força de compressão (kN); F_t – força de tracção (em kN) e A – área de aplicação (m^2).

São várias as correlações para a resistência à tracção e compressão não confinada, sendo que as rochas partem mais facilmente por tracção do que por compressão (Figura 2.10). González de Vallejo *et al.* (2004) sugerem que para rochas brandas, isto é, rochas de baixa resistência, o valor de σ_t representa 5% de σ_c , enquanto para rochas de comportamento frágil e mais duras, a relação é de 12%. A resistência do material diminui quanto maior a porosidade, o grau de meteorização e a deformabilidade (módulo de Young mais baixo) da rocha intacta. Tem correlação positiva com a densidade e com a massa volúmica.

A saturação do material tem influência na resistência que as rochas oferecem à rotura, diminuindo-a e levando a uma fracturação do material para tensões menores. Com efeito, neste caso a tensão passa a ser afectada pela pressão intersticial exercida pela água, passando a denominar-se por tensão efectiva (σ').



- a) para os diversos tipos de rotura da rocha intacta
- b) para os principais tipos de tensão

Figura 2.10 Envoltentes de rotura do critério de Hoek & Brown (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2004)

A deformação do material é exclusivamente referente ao volume e formato dos corpos, partindo da comparação destes para um estado original e para um estado deformado. Pode ser permanente, caso o corpo não retome a forma inicial, ou reversível para um comportamento elástico. Surge assim o conceito de extensão (adimensional), que são deformações unitárias induzidas no comprimento por tensões, podendo ser axiais ou laterais. A relação tensão-extensão é indicativa do comportamento reológico do material, podendo este ser dúctil, caso acomodem elevada deformação antes da rotura, ou frágeis quando recuperam a totalidade ou grande parte da deformação após a rotura do material. Neste último, regista-se uma diferença significativa entre a resistência de pico e a residual. As rochas são materiais que se deformam elasticamente quando sujeitos a solicitações, contudo são materiais rígidos, acomodando pouca deformação, e frágeis, já que sofrem rotura em domínio elástico. Contudo, este comportamento mostra variações significativas quando se comparam as rochas duras com as rochas brandas (Figura 2.11).

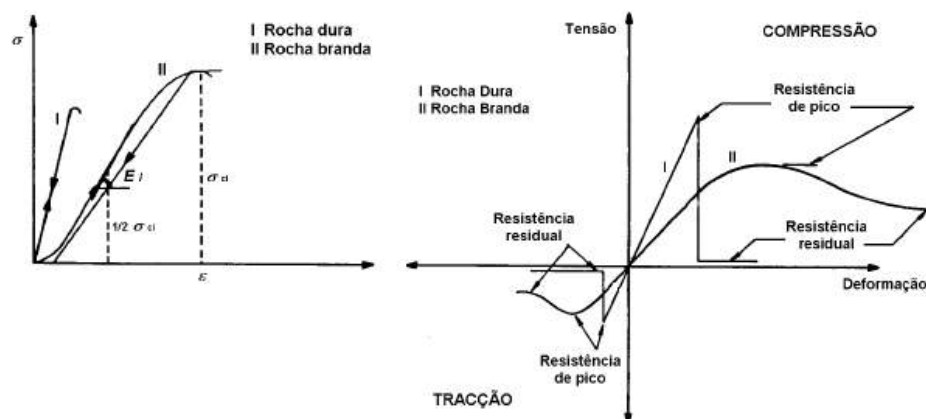


Figura 2.11 Comparação das curvas de tensão-extensão de uma rocha dura e de uma rocha branda (adaptado de Rocha, 1981)

A sua determinação pode ser feita em ensaios uniaxiais recorrendo a extensómetros para medir a deformação lateral (ε_r) e axial do provete (ε_a), representando o resultado em gráficos tensão-extensão. Com efeito, verifica-se que nos primeiros estágios de aplicação de uma força axial, o provete tem comportamento elástico, sendo possível definir o módulo de elasticidade ou de Young (E) pela relação linear entre a acção aplicada e a extensão produzida (Lei de Hooke) - Equação 2.10. Este é uma medida da rigidez do material, verificando-se que quanto maior ele for, maior é a rigidez e menor a deformação provocada no provete. Existem diferentes módulos de elasticidade, nomeadamente o inicial, o tangente e o secante, sendo que a escolha de qual calcular depende do comportamento da rocha.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_a} \quad (2.10)$$

Onde: E – GPa; σ - kN/m² e ε - adimensional.

Por outro lado, o coeficiente de Poisson (ν) define o comportamento elástico do material, descrevendo a relação entre as deformações axial e lateral do provete, concomitantes com a aplicação da carga compressiva (Equação 2.11). Para rochas e solos, o seu valor é inferior a 0,5 e depende da textura do objecto em estudo. Com efeito, uma rocha dura, tipicamente com comportamento rígido e frágil, apresenta um E mais elevado e um menor ν face a uma rocha mais branda.

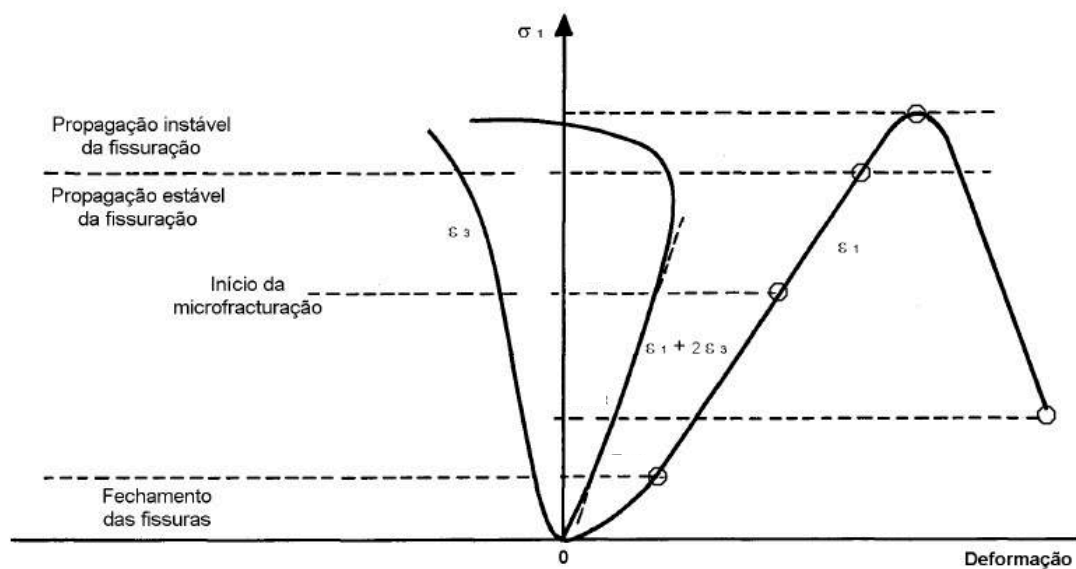
$$\nu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \quad (2.11)$$

Estes dois parâmetros caracterizam a deformação que a rocha sofre e é necessário diferenciá-los das mesmas grandezas dinâmicas (determinados pela propagação de ultrassons), que apresentam em regra valor superior. Note-se, também, que ambos os parâmetros apresentam uma gama de valores variada para uma mesma rocha, dependendo não só da mineralogia e da textura, mas também da porosidade e da possível anisotropia e heterogeneidade que a rocha possa apresentar.

Retomando o comportamento das rochas, quando estas são sujeitas a uma tensão incremental, chega a um nível em que o objecto deixa de se comportar elasticamente e passa a exibir plasticidade, o que significa que a deformação passa a ser permanente (deixa de se verificar a Lei de Hooke). Denomina-se por tensão de cedência (σ_y) o valor de tensão, para uma dada deformação, a partir do qual

o material passa a ter comportamento plástico, sendo uma medida da resistência do material, isto é, quando mais resistente, maior σ_y . O contínuo aumento da força aplicada acaba por conduzir à rotura do material, atingindo-se a tensão de pico. Em rochas, principalmente as mais frágeis, o comportamento plástico é reduzido no tempo, contudo o seu estudo, principalmente para rochas menos rígidas, é importante em engenharia. Tal permite averiguar qual a quantidade de deformação que a rocha pode suportar após o limite elástico antes de esta se tornar incontrolável.

Em suma, o comportamento mecânico da rocha intacta pode ser avaliado através de vários parâmetros. Adicionalmente, vai ser função das características intrínsecas do material bem como das condições de ensaio, nomeadamente a taxa de carregamento, a pressão de confinamento e as condições ambientais expressas na secção 2.2.3. A execução do ensaio uniaxial com medição das extensões permite avaliar a resistência e a deformabilidade e pode ser descrito pela curva teórica tensão-extensão expressa na Figura 2.12.



ϵ_1 ou ϵ_a – extensão axial; ϵ_3 ou ϵ_l – extensão lateral; $\epsilon_1 + 2\epsilon_3$ – extensão volumétrica

Figura 2.12 Curva teórica tensão-extensão de uma rocha num ensaio de compressão (adaptado de Rocha, 1981)

2.3 TRABALHOS PRÉVIOS E RESULTADOS OBTIDOS

São vários os autores que se debruçaram sobre a caracterização de rochas vulcânicas enquanto material geotécnico. González de Vallejo *et al.* (2008) descrevem, o comportamento geotécnico e as propriedades mecânicas que governam estas rochas como totalmente diferentes das rochas não vulcânicas. Efectivamente, exibem uma heterogeneidade e uma anisotropia, quer estrutural quer litológica, que se traduz em problemas complexos para a engenharia. Além disso, a maior parte dos estudos destes maciços e da rocha intacta que os compõem acabam por ficar em domínio privado, sendo escassa a informação disponível (Rodríguez-Losada *et al.*, 2007). Nesta secção explicitam-se os estudos recentes realizados sobre rochas basálticas e piroclásticas, nomeadamente a caracterização da rocha intacta e as correlações estabelecidas para facilitar o seu estudo.

O estudo dos MR, tal como exposto na secção 2.2.2, pode ser realizado no campo com recurso a classificações geotécnicas, como o GSI e, mais especificamente, geomecânicas. Para o caso específico de rochas vulcânicas, é sugerido o uso de sistemas como o VRS e o VRFSR.

2.3.1 CORRELAÇÃO DA DESCRIÇÃO MICROPETROGRÁFICA COM A CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA

Na caracterização da rocha intacta, tal como referido anteriormente (secção 2.1), a descrição de amostra de mão, bem como a análise micropetrográfica são essenciais e preliminares no seu estudo. São vários os autores que procuraram uma relação entre as características mineralógicas, de granularidade e texturais com as propriedades físico-mecânicas das rochas, inclusive nas ígneas. A ISRM recomenda um estudo petrográfico onde seja especificada a origem, a classificação e as características relevantes para o comportamento mecânico da rocha em questão (minerais secundários, texturas especiais, micro-fracturação). Por outro lado, Mendes *et al.* (1966; *apud* Bell, 1992) sugere que a micropetrografia fornece informação relevante para concluir sobre a qualidade da rocha de forma quantitativa, estabelecendo correlações com as propriedades mecânicas que se mostraram aceitáveis para material granítico. Para tal estima o grau de alteração e a micro-fracturação através de uma análise modal da mineralogia, diferenciando os minerais são dos alterados, bem como aqueles que têm efeito adverso no comportamento mecânico da rocha. Inclui ainda uma descrição da textura e da micro-estrutura, atentando no preenchimento das micro-fissuras. Abordagens semelhantes, isto é, que estabelecem uma correlação entre a descrição micropetrográfica e as propriedades de engenharia do material rocha, foram mais recentemente estudadas por Tuğrul & Zarif (1999), Sousa *et al.* (2005) e Yusof & Zabidi (2016) para rochas graníticas e por Diamantis *et al.* (2014) para rochas ultrabásicas. Conclui-se que nem sempre há um padrão de relação entre estas propriedades, dependendo do conjunto mineralógico e textural da rocha, bem como do seu grau de alteração. Por exemplo, para as rochas ultrabásicas, a serpentinização toma o papel principal como condicionante das características físico-mecânicas da rocha, sendo que este tipo de alteração não se verifica nas rochas graníticas, onde outros factores têm maior preponderância, como aspectos texturais, porosidade e fissuração. Apesar disto, a observação micropetrográfica mostra-se bastante útil, principalmente quando há dificuldade na preparação de provetes para os ensaios geotécnicos de rocha intacta. Permite descrever o material numa fase inicial, reconhecendo particularidades, como minerais secundários, resultantes da alteração, ou micro-fissuração, que possam ser relevantes nas conclusões retiradas da caracterização da rocha intacta.

2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA INTACTA E CORRELAÇÕES COM PARÂMETROS MECÂNICOS

A caracterização da rocha intacta foi realizada para várias rochas vulcânicas em todo o mundo. Nesta dissertação apresentam-se alguns valores de referência que sirvam de base de comparação aos obtidos nos diversos ensaios. Inicialmente, apresentam-se os resultados adquiridos em estudos efectuados numa área geográfica mais alargada, resumidos nas Tabelas 2.7, 2.8 e 2.9. Por fim, restringe-se o estudo para localizações mais próximas da área em estudo, nomeadamente as Ilhas Canárias e Portugal, em especial o arquipélago da Madeira.

Schultz (1995) escreve um artigo onde sumariza valores médios de deformabilidade e de resistência obtidos por diversos autores para basaltos recolhidos nos EUA, nomeadamente no *Columbia Plateau*. Dada a lacuna que verifica na quantificação dos mesmos parâmetros para maciços rochosos, apresenta uma comparação entre valores da rocha intacta e dos mesmos para MR basálticos, evidenciando a importância do efeito de escala e da heterogeneidade e anisotropia que os últimos apresentam devido à presença de descontinuidades.

Aggistalis *et al.* (1996) estabelecem correlações entre a RCU e o E com o valor de ressaltado do martelo de Schmidt (R), com o índice de compressão pontual e com o grau de meteorização. Pretendem facilitar a determinação destas variáveis, sendo que o seu estudo engloba gabros (63 amostras) e basaltos (30 amostras) obtidos no complexo ofiolítico de Pindos, na Grécia. Diversas correlações foram obtidas para basaltos, apresentadas na Tabela 2.12.

Na Índia, diversos autores a caracterizaram os basaltos constituintes das “traps” do Decão. Gupta & Seshagiri-Rao (1998) estudaram basaltos da zona de Nagpur, juntamente com rochas graníticas e quartzíticas. Estabeleceram uma correlação entre as propriedades mecânicas das rochas (σ_c , σ_t , brasileiro, Is_{50} e R) com o grau de meteorização, concluindo que há uma quebra da resistência oferecida à compressão pontual e à compressão uniaxial com o incremento da meteorização. Como tal, sugerem que não se deve usar um único factor de correlação para toda uma gama de meteorização, mesmo numa mesma rocha. Gupta & Seshagiri-Rao (2000) utilizaram amostras das mesmas rochas e evidenciam que as propriedades mecânicas dependem das características intrínsecas das rochas alteradas. Encontram uma relação adequada para as rochas ígneas entre o módulo de deformabilidade tangente e σ_c (Tabela 2.12). Posteriormente, novas correlações são apresentadas por Sharma & Singh (2008) para diferentes tipos rochosos, incluindo quatro amostras de basalto alterado proveniente também das “traps” do Decão. Na Tabela 2.7 apresentam-se os valores médios de V_p e σ_c .

Bell (2007) apresenta uma tabela onde compila valores de rocha intacta para basaltos do Lesotho, África do Sul (Bell *et al.*, 1995), sendo que a sua descrição textural e mineralógica é feita em Haskins & Bell (1995).

Moon & Jayawardane (2004) realizam um estudo geomecânico e geoquímico de basaltos amostrados em *Karamu*, Nova Zelândia, e evidenciam a variação dos valores de rocha intacta com o grau de meteorização. Concluem que, para os primeiros estágios de alteração, onde não há a formação significativa de minerais secundários nem macrofracturação, ocorre uma variação visível na assinatura geoquímica e um decréscimo de resistência. Salientam que um material ligeiramente alterado pode nem sempre ser apto para fins de engenharia, dados os defeitos microscópicos possivelmente presentes e não visíveis à escala do afloramento e em amostra de mão.

O estudo de rochas vulcanoclásticas amostradas no Grupo Vulcânico *Borrowdale*, Reino Unido, foi realizado por Entwistle *et al.* (2005) para definir algumas correlações. A forma como a rocha falha quando sujeita a compressão uniaxial depende da respectiva competência: trechos com núcleos de pior qualidade ou com uma rede de fracturas são os mais favoráveis à rotura. Os valores de porosidade efectiva e da propagação de ultrassons da rocha não permitem distinguir entre aquelas que apresentam modos de fractura diferentes. Fizeram 277 ensaios para obtenção de n_e , 177 testes para determinar a RCU e 261 medições da velocidade de ultrassons, que estão sumarizados na Tabela 2.8.

Dinçer *et al.* (2004) realizaram um estudo sobre as rochas vulcânicas da Península de *Bodrum*, na Turquia, nomeadamente andesitos, basaltos e tufos, totalizando 24 amostras. O seu estudo permite estabelecer correlações, para os vários litótipos, entre os valores de RCU e do R e entre o E e o R . Estas são tanto mais adequadas quando aplicadas a rochas vulcânicas com grau de meteorização e estrutura semelhante às do estudo, estando sumarizadas na Tabela 2.12 e os valores obtidos para a rocha intacta na Tabela 2.9. Kocbay & Kilic (2006) apresentam as propriedades mineralógicas, petrográficas e geomecânicas de 105 amostras de basalto obtidas em Corum, Turquia, de forma a estudar os terrenos da barragem de Obruk. Complementam o seu estudo classificando o maciço segundo os sistemas RMR e Q (Barton *et al.*, 1974). Para rochas vulcânicas do Monte *Erciyes*, também na Turquia, Yuksek & Demirci (2010) estudam as suas propriedades físico-mecânicas, tentando estabelecer correlações entre diversas variáveis. Estas, contudo, são pouco significativas, porém os resultados obtidos para rochas calco-alcalinas e piroclásticas (basaltos, andesitos, pedra pomes, ignimbritos consolidados e tufos), mostram-se úteis como referência. Os valores que caracterizam as rochas vulcânicas da Turquia integram a Tabela 2.9.

Tabela 2.7 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas dos EUA, Grécia e Índia

Local	Autor	Rocha vulcânica	Parâmetros										
			ρ_d (Mg/m ³)	n (%)		V_p (m/s)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is_{50} (MPa)	R	E (GPa)	ν	c (kPa)
				n	n_e								
EUA	Schultz (1995) (RMR) ^a	Basaltos	–	–	–	–	266,0 (10-90) ^a	-14,5 (-0,1 - -2,5) ^a	-	-	77,9 (10-40) ^a	0,25 (0,30) ^a	66 (0,6-6) ^a
Grécia	Aggistalis <i>et al.</i> (1996)	Basaltos	–	–	–	–	46,65	–	3,10	42,37	5,05	–	–
Índia	Gupta & Seshagiri-Rao (1998; 2000) *provetes prismáticos	Basalto W ₁	2,96	0,66	0,64	5760	172,55	27,46	–	–	46,51	0,19	–
		Basalto W ₃	2,74	5,24	4,97	4390	93,2	16,25	–	–	20,63	0,26	–
		Basalto W ₄	2,47	13,54	9,50	1210	17,80	1,90*	–	–	2,77	0,27	–
		Basalto W ₅	1,83	30,13	29,52	–	3,40	0,21*	–	–	0,63	–	–
	Sharma & Singh (2008)	Basaltos	–	–	–	2759,40	65	–	–	–	–	–	–

Tabela 2.8 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas de África do Sul, Nova Zelândia e Reino Unido

Local	Autor	Rocha vulcânica	Parâmetros											
			ρ_d (Mg/m ³)	n (%)	w (%)	V _{ultrassons} (m/s)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	IS ₅₀ (MPa)	R	E (GPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
África do Sul	Bell & Haskins (1997)	Basalto muito amigdalóide	2,64	—	—	—	90	9,0	—	—	33,3	0,23	—	33,3
		Basalto moderadamente amigdalóide	2,72	—	—	—	112	11,6	—	—	39,7	0,23	—	39,7
		Basalto não amigdalóide	2,77	—	—	—	123	9,7	—	—	38,0	0,24	—	38
Nova Zelândia	Moon & Jayawardane (2004)	Basalto W ₁	2,81	0,32	0	—	262	—	5,6	33	—	—	—	—
		Basalto W ₂	2,12	7,96	29	—	—	—	0,41	19	—	—	—	—
		Basalto W ₃	1,91	14,48	46	—	—	—	—	—	—	—	1	—
		Basalto W ₄	1,76	20,61	43	—	—	—	—	—	—	—	4	—
		Basalto W ₅	1,54	25,39	43	—	—	—	—	—	—	—	5	—
Reino Unido	Entwistle <i>et al.</i> (2005)	Basaltos	—	0,98	—	5960	139,8	—	—	—	—	—	—	—

Tabela 2.9 Valores de parâmetros físico-mecânicos de rochas vulcânicas da Turquia

Local	Autor	Rocha vulcânica	Parâmetros									
			γ (kN/m ³)		n (%)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	I_{s50} (MPa)	R	E (GPa)
			seco	saturado								
Turquia	Dinçer <i>et al.</i> (2004)	Basaltos	25,74		—	—	—	86,48	—	—	44,32	16,00
		Tufos	18,44		—	—	—	41,97	—	—	29,40	6,92
	Kilic & Kocbay (2006)	Basaltos	25,71	26,01	7,17	4997	2525	52,57	—	6,27	—	E _s = 39,25 E _d = 451,64
		Basaltos	26,86	19,79	2,83	4760	—	175,19	—	—	—	—
	Yusek & Demirci (2010)	Tufos	15,42	18,60	26,72	1954	—	24,95	—	—	—	—

Os trabalhos que reportam a uma localização geográfica mais próxima da área de estudo incluem essencialmente os arquipélagos das Canárias, da Madeira e dos Açores. Note-se que em todos, a natureza química dos materiais vulcânicos, nomeadamente os basaltos, é alcalina tal como no CVL. Apesar de existirem outros factores que têm influência predominante nas propriedades físico-mecânicas, considera-se que os resultados obtidos para estes locais têm grande relevância. Na sua maioria, os artigos foram apresentados em 2002, na Madeira, no âmbito do *Workshop in Volcanic Rocks*, em 2007, nos Açores, no *International Workshop on Volcanic Rocks*, e em 2010, em Tenerife, no *3rd International Workshop on Rock Mechanics and Geo-engineering in Volcanic Environments*.

Especificamente para o CVL, Soares *et al.* (2002) determinam as propriedades geomecânicas daqueles basaltos para um número limitado de amostras recolhidas na Pedreira de Moita da Lavra (em Vialonga, Vila Franca de Xira) e realizam um conjunto de ensaios que visam uma caracterização das rochas, tanto para projectos de engenharia como para exploração industrial como material de construção. Os resultados dos ensaios encontram-se na Tabela 2.10 e as correlações estabelecidas na Tabela 2.12.

Também num contexto geográfico português, Ribeiro e Sousa & Moura (2007) apresentam um estudo executado aquando a construção do túnel de ligação Caniço-Camacha, na ilha da Madeira, que contém grande heterogeneidade e diferentes formações de rochas vulcânicas, tendo proposto um modelo empírico preliminar de classificação de rochas vulcânicas que não foi considerado nesta tese por ser referido a necessidade de calibração e correlação com outros sistemas desenvolvidos para formações diferentes. Posteriormente, destaca-se o trabalho de Lourenço *et al.* (2010) que compila os dados recolhidos ao longo de 20 anos, em 48 projectos de túneis desenvolvidos na mesma ilha. Os autores distinguem os principais grupos de rochas (basaltos, brechas e tufos), tendo natureza maioritariamente basáltica, e agrupam-nos em função do seu grau de alteração e fracturação. Além disso, conciliam a caracterização de campo (pelo GSI) e de laboratório dos vários materiais. Atribuem intervalos de GSI de 70-90, 55-75 e 40-60 para os basaltos W_{1-2} , $W_{2,3}$ e $W_{3,4}$, respectivamente. As brechas $W_{2,3}$ e $W_{4,3}$ caracterizam-se por intervalos de GSI de 45-75 e 35-55.

Malheiro (2010) desenvolve uma contribuição para a caracterização geotécnica de piroclastos basálticos presentes nos arquipélagos da Madeira e Açores, com a respectiva comparação e concluindo que há semelhanças no sentido da sua aplicação em engenharia civil, referindo quais as potenciais utilizações nessa área e problemas associados. Silva *et al.* (2010) apresentam um artigo onde correlacionam as características litológicas (petrográficas, mineralógicas, químicas) de rochas das ilhas dos Açores (São Miguel e Santa Maria) com o seu comportamento físico-mecânico para efeitos do seu uso como material de construção. As rochas amostradas, tipicamente de natureza alcalina e pertencente à série básica-intermédia, apresentam valores de RCU por norma superiores a 40 MPa, com porosidade relativamente alta (superior a 10%) e densidade aparente baixa, verificando-se que, como seria de esperar, menor porosidade leva a maior RCU.

Em 2006, González de Vallejo publica o livro “Caracterización geomecánica de los materiales volcánicos de Tenerife”, onde faz uma compilação do trabalho desenvolvido até à data, incluindo uma descrição geológica, estrutural e da estabilidade do material vulcânico. Em função destes, separa-o em unidades geotécnicas e refere ainda as propriedades que mais se relacionam com a problemática geotécnica dos materiais e processos vulcânicos (Hernández-Gutiérrez, 2014). Este trabalho encontra-se sintetizado em González de Vallejo *et al.* (2008). Este baseou-se, em parte, no artigo de 2007 desenvolvido pelos mesmo autores, onde é feita uma caracterização geomecânica das rochas da ilha de Tenerife que parte de um reconhecimento de campo e colecta bibliográfica (González de Vallejo *et al.*, 2007). Distingue lavas basálticas, traquíticas e fonolíticas, bem como diques e outras estruturas intrusivas e depósitos piroclásticos (tufos, ignimbritos e aglomerados). Os basaltos têm uma massa volúmica seca que varia entre 1,5 a 3,2 Mg/m³, dependendo se são vacuolares ou maciços. Tem valores de σ_c entre 25 e 160 MPa, dependendo se têm fenocristais ou vacúolos. Os basaltos podem ainda ter valores de E entre 15 a 30 GPa e ângulos de atrito interno entre 40 e 55° (Tabela 2.11).

Tabela 2.10 Valores de parâmetros físico-mecânicos de algumas rochas vulcânicas de Portugal

Local	Autor	Rocha vulcânica		Parâmetros					
				γ (kN/m ³)	Grau de fracturação	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	I_{S50} (MPa)	E (GPa)
Portugal Continental	Soares, <i>et al.</i> (2002)	Basalto		–	–	113,05	14,52	7,86	–
Madeira	Lourenço <i>et al.</i> (2010)	Basalto	W _{1,2}	28-31	F ₂₋₃	100-1000	–	–	50-100
			W _{2,3}	25-28	F ₃₋₄	10-100	–	–	10-75
			W _{3,4}	23-25	F ₄₋₅	1-10	–	–	1-6
		Brechas	W _{2,3}	–	F ₃₋₄	8-60	–	–	5-65
			W _{4,3}	–	F ₄₋₅	1-8	–	–	0,1-8
			W ₅ – N/A	–	N/A	–	–	–	–
		Tufos	Brechóides (W ₄₋₅)	–	–	0,5-7	–	–	0,1-2
			Granulares (N/A)	–	N/A	1,5-10	–	–	0,2-1
			Com silte e argila	–	N/A	0,5-10	–	–	0,3-4

Tabela 2.11 Valores de parâmetros físico-mecânicos e dinâmicos de rochas vulcânicas das Ilhas Canárias

Local	Autor	Rocha vulcânica	Parâmetros												
			γ (kN/m ³)	n _e (%)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	IS ₅₀ (MPa)	R	E _s (GPa)	E _d (GPa)	v _d	c (MPa)	ϕ (°)
Canárias	González de Vallejo <i>et al.</i> (2007)	Basaltos	15-31	-	-	-	25-160	-	-	-	15-30	-	-	-	40-55
		Tufos	8-18 (pouco compacto)	-	-	-	1-50	-	-	-	0,1-22	-	-	0-1,45	12-30
			18-25 (consolidado)	-	-	-	<10 (saturado)	-	-	-	-	-	-	-	(alterados)
	Rodríguez-Losada <i>et al.</i> (2009)	Escórias basálticas	Podem ser observados nos gráficos do artigo e em Rodríguez-Losada <i>et al.</i> (2007)											0,15	20
		Basaltos maciços e fonolitos												0,45	50
	Hernández-Gutiérrez (2014)	BOPM	29,1	4,10	5172,3	2783,4	114,5	47,9	6,6	82,4	30,7	69,5	0,28	-	-
		BOPV	25,4	8,24	3466,3	1836,0	47,7	28,2	5,4	47,8	15,6	44,0	0,29	-	-
		BPLV	25,1	3,33	3738,5	1548,0	36,1	22,1	2,3	50,0	24,6	21,5	0,39	-	-
		BPLM	25,1	4,85	2882,5	2024,5	60,9	25,0	4,6	39,7	-	40,1	-	-	-
		BAFV	23,3	11,03	3469,7	1810,0	31,3	21,7	4,9	58,0	16,9	30,6	0,27	-	-
		BAFM	28,4	3,59	5602,0	2665,0	104,4	50,3	7,0	79,3	64,6	58,9	0,35	-	-
		BOP- basalto olivínico piroxénico; BP- basalto plagioclásico; BAF – basalto afanítico; M- maciço; V- vacuolar													

Rodríguez-Losada *et al.* (2007) estudam as propriedades geotécnicas de ignimbritos consolidados, bem como as propriedades geotécnicas das rochas vulcânicas das Ilhas Canárias, propondo uma classificação preliminar em diferentes litotipos consoante as características texturais e mineralógicas: basaltos vesiculares e maciços (afaníticos, olivínico-piroxénicos, plagioclásicos), basaltos escoriáceos, traquibasaltos, traquitos, fonolitos e ignimbritos consolidados ou não. Para cada um, realizaram um conjunto de ensaios, nomeadamente velocidade de propagação das ondas P e S, massa e peso volúmicos, RCU, resistência à compressão deduzida do ressalto, resistência à tracção (ensaio brasileiro), resistência à compressão pontual, módulo de Young e o coeficiente de Poisson. As correlações resumem-se na Tabela 2.12.

Este trabalho serviu de base à tese de doutoramento de Hernández-Gutiérrez (2014), um novo contributo para a caracterização de rochas vulcânicas das ilhas Canárias, e que as sub-divide segundo os mesmos litotipos. Para as 344 amostras recolhidas, realiza um estudo vasto em laboratório que lhe permite obter novas correlações estatísticas. Também com base no trabalho previamente referido (Rodríguez-Losada *et al.*, 2009), surge um novo artigo onde há a correlação entre as propriedades geomecânicas da rocha intacta e dos maciços das ilhas Canárias, com a estabilidade dos terrenos vulcânicos ali existentes. O obtido nos ensaios uniaxial e triaxial, a descrição feita com o GSI e as características texturais e estruturais permitiram estimar os parâmetros de Mohr-Coulomb, coesão e ângulo de atrito, dos maciços com recurso ao critério de Hoek & Brown (Hoek *et al.*, 2002). São, respectivamente, 0,15 MPa e 20° para as escórias basálticas, sendo que os basaltos maciços e os fonolitos têm valores máximos na ordem de 0,45 MPa e 50°. Os restantes resultados podem ser consultados nos gráficos do artigo. Verificam, ainda, que a altura dos taludes tem influência na estabilidade, tal como o grau de alteração. É dado especial ênfase aos piroclastos pouco consolidados, materiais que se demonstram colapsíveis e mais susceptíveis à instabilidade.

Também Del Potro & Hürlimann (2008) debruçam-se sobre a estabilidade dos edifícios vulcânicos e a influência das propriedades geotécnicas dos materiais constituintes nessa estabilidade, propondo uma nova classificação geotécnica de maciços e descrita sumariamente na secção 2.2.2. Para cada unidade geotécnica apresentam o seu peso volúmico e a sua resistência. Também para os maciços rochosos das Canárias, Muñiz Menéndez & González-Gallego (2010) evidenciam quais os parâmetros mais importantes a ter em conta para a sua classificação, caso sejam lávicos ou piroclásticos, salientando que os sistemas habituais nem sempre são adequados. Tal como os autores anteriores, também são referenciados na secção 2.2.2.

Por fim, o livro de Hernández-Gutiérrez & Cerezal (2015) é uma compilação recente de diversos estudos geotécnicos relevantes para a caracterização de rochas vulcânicas e dos maciços dos quais advêm.

A tabela 2.12 reúne correlações estabelecidas, na sua maioria, para rochas vulcânicas. Evidencia-se a sua diversidade, reflectindo o facto de as características variarem de amostra para amostra de rochas vulcânicas e dependendo de um vasto conjunto de factores, como as características texturais, mineralógicas físicas e mecânicas.

Tabela 2.12 Correlações de parâmetros mecânicos estabelecidas essencialmente para rochas vulcânicas

Autor	Correlações	Litologia
ISRM (1985)	$\sigma_c = (20, \dots, 25) I_{S50}$ $I_{S50} = 0,80 \sigma_t$	Variada
ASTM (2008)	$\sigma_c = (18, \dots, 24,5) I_{S50}$	Variada
Read et al. (1980)	$\sigma_c = 20 I_{S50}$	Basaltos
Chau & Wong (1996)	$\sigma_c = 12,5 I_{S50}$	Granitos e tufos
Aggitalis et al. (1996)	$\sigma_c = 1,18R - 22,37W + 25,9$, onde W representa o grau de meteorização $\sigma_c = 2,96 I_{S50}$ $\sigma_c = 2,22R - 47,67$	Basaltos
Gupta & Seshagiri Rao (2000)	$E_t = \sigma_c^{0,98} \times 286$	Basaltos, granitos, quartzitos
Soares, et al. (2002)	$\sigma_t = 1,91 I_{S50}$ $\sigma_c = 14,04 I_{S50}$	Basaltos
Dinçer et al. (2004)	$\sigma_c = 2,75R - 36,83$ $E = 0,47R - 6,25$ $E = 0,17 \sigma_c + 0,28$	Andesitos, basaltos, tufos
Rodríguez-Losada et al. (2007)	$\sigma_c = 1,18 \sigma_{cSchmidt}$ $\log \sigma_{cSchmidt} = 0,00034 \gamma R + 0,0426 \gamma - 0,0017 R + 0,41$ $\sigma_c = k_1 I_{S50}$, onde $k_1 = (13, \dots, 15)$ $\sigma_t = \sigma_c / k_2$, onde $k_2 = 0,0133 \sigma_c + 0,95$ $E_d / \sigma_c = k_3$, onde $k_3 = -2,7904 \sigma_c + 850,39$	Basaltos, fonolitos, ignimbritos e traquibasaltos (com variações texturais e mineralógicas)
Sharma & Singh (2008)	$\sigma_c = 0,0642 v_p - 117,99$	Variada (inclui basaltos)
Hernández-Gutiérrez (2014)	$\sigma_c = 1,24 \sigma_{cSchmidt}$ $\log \sigma_{cSchmidt} = 0,00034 \gamma R + 0,0426 \gamma - 0,0017 R + 0,41$ $\sigma_c = 15,1 I_{S50}$ $\sigma_c = 2,2 \sigma_t$ $E_d = k_3 \sigma_c$, onde $k_3 = -2,7904 \sigma_c + 850,39$ $E_d = 1,7 E_s$	Basaltos, fonolitos, ignimbritos e traquibasaltos (com variações texturais e mineralógicas)
k ₁ - coeficientes de correlação entre σ_c e I_{S50} ; k ₂ – equação de correlação entre σ_t e σ_c ; k ₃ – equação de correlação entre E_d e σ_c		

3 CASO DE ESTUDO – COMPLEXO VULCÂNICO DE LISBOA

3.1 ENQUADRAMENTO

O Complexo Vulcânico de Lisboa – CVL, decorre na sequência do magmatismo que afecta a Bacia Lusitaniana, situando-se temporalmente no Cretácio Superior e manifestando-se na região de Lisboa e seus arredores. Importa como tal compreender o seu enquadramento geotectónico, dada a origem síncrona com importantes eventos geológicos. Com efeito, existe um conjunto de episódios de natureza ígnea que se associam ao processo de *rifting* responsável pela génese da Orla Meso-Cenozóica, pela actual configuração do Oceano Atlântico e pela reorganização do Mar de Tétis (Kullberg *et al.*, 2013).

Ferreira & Macedo (1983 apud Kullberg *et al.*, 2013) sugerem três ciclos magmáticos atendendo a diferenças químicas, temporais, espaciais e no enquadramento tectono-magmático - Figura 3.1. O 1º ciclo, de natureza sub-alcalina toleítica, ocorre entre 180 e 200 Ma e associa-se à abertura do Oceano Atlântico central. O 2º episódio, de natureza transicional e com idade compreendida entre 141 e 147 Ma, materializa o regime distensivo que decorre entre o Jurássico Superior e o início do Cretácico. O 3º ciclo, com natureza alcalina e inserido no intervalo temporal dos 72 aos 94 Ma, está vastamente representado no território português, nomeadamente nos complexos ígneos de Sintra, Sines e Monchique, no vulcanismo da Bacia Algarvia, no Complexo radial de Mafra e no CVL. Durante este último período, onde se deram as últimas fases de *rifting* da Bacia Lusitaniana e consequente formação de crosta oceânica, terão ocorrido dois pulsos magmáticos descritos por Miranda *et al.* (2009a; apud Kullberg *et al.*, 2013). O primeiro, manifesta-se entre 94 e 98 Ma e é contemporâneo da abertura do Golfo da Biscaia e rotação da Ibéria. O segundo, que se dá entre 75 e 72 Ma, acompanha a colisão das placas Ibérica, Euroasiática e Africana. Tem uma distribuição geográfica mais ampla, sendo que a origem do CVL se insere neste contexto (Kullberg *et al.*, 2013). A ideia sumária reside no facto de o CVL ter um enquadramento que vai para além da Península Ibérica, inserindo-se num quadro temporal vasto que acompanha um contexto cronológico e estrutural síncrono à abertura do Oceano Atlântico norte. É tipicamente característico de um ambiente tectónico intraplaca continental (Matos Alves *et al.*, 1980).

O CVL tem uma extensão vasta, ocupando 200 km², desde a península de Lisboa até Torres Vedras e Arruda dos Vinhos, atingindo ainda o Sul do Tejo (Matos Alves *et al.*, 1980). Dispõe-se segundo uma estrutura monoclinal com ligeira inclinação para Sul e que acompanha as camadas datadas do Cretácico e os mantos lávicos. Os relevos basálticos, fortemente alterados e parcialmente obliterados, evidenciam a acção de um conjunto de fenómenos erosivos (naturais e antrópicos) que terão contribuído para a existência pontual e descontínua de morfologias típicas de terrenos vulcânicos (Serralheiro, 1978). Quanto à geologia, o conjunto assenta sobre calcários margosos e calcários recifais do Cenomaniano ou, alternativamente, sobre um carso fóssil. Está subjacente aos depósitos conglomeráticos do Paleogénico denominados por Complexo de Benfica, e às unidades do Miocénico (Ramalho *et al.*, 1993, 2001; Pais *et al.*, 2006). Contém várias estruturas (chaminés, escoadas, soleiras, diques, etc) e litologias rochosas (basaltos, piroclastos, brechas, traquitos, etc), sendo que determinações geocronológicas apontam para uma idade de 72 Ma (Palácios, 1985; Matos Alves *et al.*, 1980). Observam-se na sua estrutura escoadas lávicas, que podem ter até 12 m de espessura, intercaladas com níveis piroclásticos que aparecem repetidamente e com espessuras variáveis. Também demonstram que o vulcanismo basáltico terá sido predominantemente efusivo (representado pelas escoadas) já que os produtos explosivos (piroclastos e brechas) representam uma percentagem minoritária na volumetria

total. Além disso, tem um carácter esporádico testemunhado pela existência de organismos fossilizados (tipicamente de ambiente lacustre e fluvial) que terão tido origem em períodos de repouso. Serralheiro (1978) evidencia a forte erosão e meteorização nestes períodos já que a deposição de um novo manto faz-se sobre um anterior fortemente meteorizado, sendo comum a erosão das estruturas tipicamente vulcânicas, bem como a formação de paleossolos (Ramalho *et al.*, 1993, 2001; Pais *et al.*, 2006).

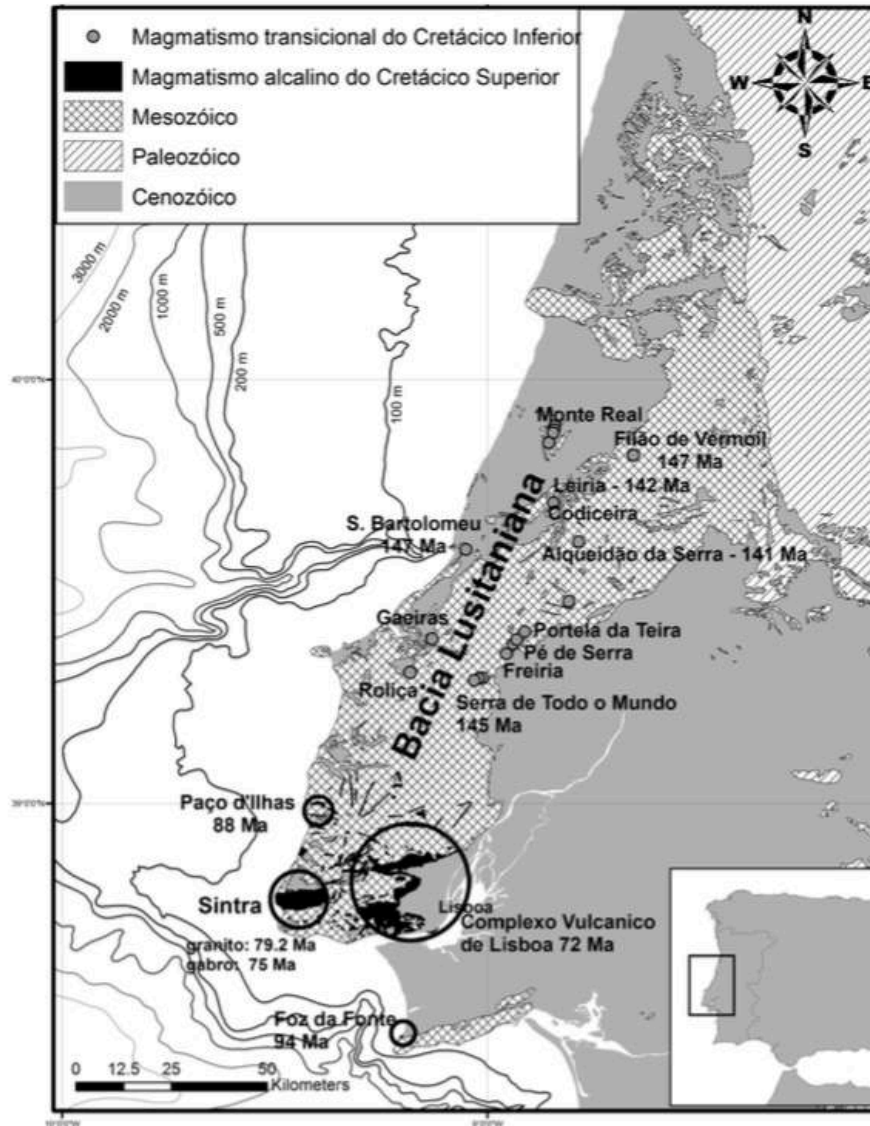


Figura 3.1 Principais ocorrências magmáticas transicionais (2º Ciclo) e alcalinas (3º Ciclo) na Bacia Lusitaniana (Kullberg *et al.*, 2013)

O mesmo autor mostra dificuldade em delinear a estrutura do CVL dado o seu carácter e conhecimento fragmentários. Adicionalmente, evidencia que dada a sua vasta área e assimetria, o CVL terá sido o resultado da acção de vários centros eruptivos, situando-se os principais na zona de Cheleiros e Malveira. As chaminés mais antigas, quatro, são constituídas por brechas eruptivas de diferentes granulometrias e estão fortemente alteradas. As restantes oito chaminés, mais recentes, materializam um segundo episódio eruptivo e manifestam-se segundo montes ou cabeços com formato cónico em resultado dos depósitos de vertente. Apesar da problemática do nível erosivo, Serralheiro (*op. cit.*) propõe uma reconstituição dos aparelhos vulcânicos com centro nas chaminés referidas, sugerindo um cone com um raio de base de cerca de 27 km (20 km se não se incluírem as escoadas isoladas) e uma altura máxima na ordem de 2,8 km (considerando uma inclinação média inicial de 8º para as escoadas). Pensa-se que a destruição mais proeminente do edifício vulcânico terá tido lugar no Miocénico e,

também, no Pliocénico, em consequência da acção marítima. Nesta altura, o nível do mar a elevada altitude e o clima quente e húmido terão contribuído para a alteração intensa, resultando num descarnamento das condutas eruptivas principais, deixando salientes os rolhões das chaminés (*op. cit.*). O abaixamento do mar terá conduzido à instalação da rede de drenagem actual que levou à evidência dos relevos hoje observados.

Os materiais piroclásticos apresentam fortes graus de alteração, e podem ocorrer consolidados ou não, e segundo diferentes granulometrias. Com efeito, observam-se depósitos não consolidados de *lapilli* e cinzas até brechas piroclásticas grosseiras na base de escoadas juntamente com outros aglomerados vulcânicos (Pais *et al.*, 2006). Choffat (1950 *apud* Serralheiro, 1978) e Serralheiro (*op. cit.*) descrevem como frequente a ocorrência de tufos contendo pequenos calhaus de calcário que terão sido arrancados das paredes das condutas. Grande parte desta litologia é constituída por elementos de basaltos alterados, contendo amígdalas e vesículas com calcite e zeólitos. Também os mantos basálticos, fortemente fracturados, apresentam o chamado “cartão da montanha” (calcite e zeólitos) nas diaclases.

Os basaltos são a rocha predominante, ocorrendo juntamente com outras mais escassas e diferenciadas (traquibasaltos, traquitos e riolitos) (Figura 3.2) e com tipos petrográficos granulares e básicos - gabros (Palácios, 1985). Em termos petrográficos, apresentam forte variação textural e composicional, existindo exemplos de tipos afíricos muito finos até outros extremamente porfíricos, onde a geração de fenocristais é igual ou superior a 50% e envolta por uma matriz afanítica (*op. cit.*). A mineralogia comprova a alcalinidade e o carácter titanífero, tal como a assinatura geoquímica das rochas. Como fenocristais ocorrem espinela cromífera (rara), olivina, clinopiroxena, plagioclase (raramente em fenocristais) e anfíbola castanha. Na matriz a mineralogia é semelhante, tendo-se clinopiroxena, plagioclase, minerais opacos, quantidades variáveis de olivina, feldspato alcalino, analcite, vidro, zeólitos (frequente nas amígdalas e nas fracturas), biotite (rara e tardia), apatite (prismática e inclusa em fenocristais de clinopiroxena) e outros produtos secundários e/ou tardios. Das rochas afíricas ocorrem limburgitos (predominância de augite) com textura ofítica a sub-ofítica (termo menos diferenciado) e outras rochas com textura fluidal e plagioclase predominante (termo mais evoluído) (Ramalho *et al.*, 1993, 2001; Pais *et al.*, 2006). Nas rochas de textura porfírica, a olivina e a clinopiroxena constituem os minerais predominantes nas fases fenocristalinas, sendo a augite também maioritária na matriz. Menos frequentemente, podem existir fenocristais de plagioclase, sendo também de percentagem mais elevada na matriz nesta situação. Este último caso consiste no tipo petrográfico mais diferenciado (Palácios, 1985).

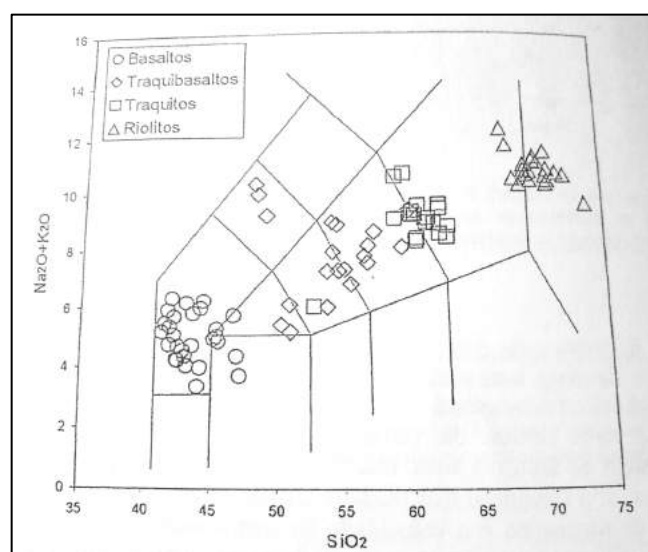


Figura 3.2 Rochas vulcânicas do CVL no diagrama TAS (Palácios, 1985)

A evolução mineral é descrita por Matos Alves *et al.* (1980). As augites terão sido as primeiras a cristalizar, contribuindo para a diminuição da percentagem de Si no líquido residual, o que conduz à geração de minerais pobres e deficientes neste elemento, como as Ti-augites, a orlar as anteriores. A concentração de P, Ti e Fe³⁺ no líquido magmático leva à génese de apatite, magnetite, Ti-magnetite e/ou ilmenite. Em fase mais tardia e para um dado grau de consolidação, aparecem as anfíbolos. A não cristalização de minerais ricos em Si permitiu o incremento deste elemento no líquido, possibilitando, por sua vez, a cristalização de fenocristais de plagioclase. Há um novo empobrecimento em Si e a ocorrência de um rápido arrefecimento que induz a separação gravítica dos minerais existentes durante o “arrastamento” magmático. Neste processo ocorre a diferenciação do magma residual pela seguinte ordem: olivinas, augites sódicas, aegirinaugite, plagioclase, zircão, biotite e feldspatos potássicos. A distribuição de Rb sugere uma fase de metamorfismo hidrotermal que terá gerado feldspatóites (analcite) (*op. cit.*).

Palácios (1985) realizou uma análise geoquímica dos elementos traço e menores que permitem tirar diversas conclusões. Com efeito, comprovam a alcalinidade da série magmática e a evolução dos termos rochosos de acordo com uma sobressaturação em sílica. Além disso, confirmam um ambiente de formação tipicamente intraplaca e o regime distensivo do mesmo. A presença de fenocristais nas escoadas lávicas, a regularidade na variação química dos minerais que constituem as soluções sólidas, a existência de rochas com diferentes graus evolutivos, o predomínio dos termos básicos e o comportamento dos elementos menores, sugerem a cristalização fraccionada como o mecanismo mais contributivo para a diversidade magmática e petrográfica do complexo (*op. cit.*), tal como descrito por Matos Alves *et al.* (1980). Contudo, os dados isotópicos indicam também a ocorrência de assimilação crosta nos termos mais diferenciados, ainda que em menor escala. Adicionalmente, a mesma autora conclui que os magmas primários de que advêm os basaltos resultam de uma fonte mantélica homogénea que terá sofrido diferentes graus de fusão parcial (entre os 6% aos 14%). Esta fonte deve apresentar uma composição mineralógica típica de um lherzolito granatífero, bem como deve ter sido sujeita a um enriquecimento em elementos incompatíveis, em particular alcalinos e terras raras leves (LILE). Estes basaltos, por vezes, mostram uma íntima relação com os da Madeira (Matos Alves *et al.*, 1980).

Contrariamente à vasta informação petrográfica e geoquímica do CVL, a caracterização geotécnica, quer de campo, quer de rocha intacta é muito escassa para os materiais vulcânicos deste complexo. A presente tese visa dar um contributo para o conhecimento actual do CVL nesta vertente e complementar os estudos feitos noutras áreas das Ciências da Terra.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O CVL inclui, tal como dito, dois grupos principais de litologia: os basaltos pertencentes às escoadas e o material piroclástico que as intercala. Nesta secção apresentam-se os materiais adquiridos deste complexo em diversos locais. Estes consistem em basaltos, tendo parte sido amostrada como blocos rochosos e outra proveniente de tarolos de sondagens realizadas durante os trabalhos de reconhecimento geotécnico executados para expansão do Metropolitano de Lisboa. As várias amostras são referenciadas em função da localização de amostragem. Complementarmente, é realizado um estudo de campo sobre um maciço basáltico cujas propriedades mecânicas foram determinadas por Soares *et al.* (2002). Com isto, nesta dissertação consideram-se as seguintes denominações dos materiais em estudo:

- BLV: basaltos obtidos nos trabalhos do Metropolitano de Lisboa, linha vermelha (Troço Alameda II - S. Sebastião II);
- BLA: basaltos obtidos nos trabalhos do Metropolitano de Lisboa, linha azul (Troço Pontinha - Falagueira);
- BQ: basaltos obtidos em Queijas;

- BM: basaltos obtidos no Parque Florestal de Monsanto, Lisboa;
- BA: basaltos obtidos em Alcântara, Lisboa;
- BV: basaltos do maciço de Vialonga, Vila Franca de Xira.

Este capítulo inclui, também, os dispositivos, os equipamentos e os métodos adoptados para a caracterização física das amostras e realização dos ensaios laboratoriais. Para estes refere-se no que consistem, qual a sua finalidade, quais os requisitos para os provetes de ensaio (estabelecidos pelas normas ASTM e recomendações ISRM), o procedimento sumarizado e os parâmetros a considerar para a apresentação dos resultados.

Para cada grupo é especificada a amostragem e, quando necessário, são definidos tipos geotécnicos em função do grau de alteração e fracturação (W e F, respectivamente). Para tal, procede-se a uma descrição geral das amostras de mão, seguida da observação microscópica de lâminas delgadas representativas de cada grupo. Os diversos métodos utilizados para a descrição tanto das amostras como do maciço sumarizam-se na Figura 3.3

Amostra de mão e provetes	<ul style="list-style-type: none"> • Lupa de bolso • Craveira (digital e analógica)
Lâmina delgada	<ul style="list-style-type: none"> • Microscópio de luz transmitida • Fotografias obtidas com PROMICAM (acoplado ao microscópio) • Microscópio de luz reflectida (para os opacos) • NP EN 12407 (2008)
Campo	<ul style="list-style-type: none"> • Bússola • Martelo de Schmidt Tipo L • Microsoft Excel • Openstereo

Figura 3.3 Diagrama resumo dos métodos de estudo utilizados para descrever o material

Para todos os grupos amostrados preparam-se os provetes a partir de tarolos de sondagem ou de blocos rochosos. Todo o procedimento encontra-se resumido na Figura 3.4. Com efeito, os blocos rochosos são primeiro caroteados em laboratório com diâmetro superior a NX (54 mm), dimensão mínima recomendada pelas normas internacionais para a maioria dos ensaios geotécnicos. Para as amostras que apresentem diversos graus de alteração e fracturação, realiza-se o seu agrupamento tal como referido. Suplementarmente, para todos os provetes foi medido o diâmetro. É em função deste e das especificações das normas ASTM e das recomendações da ISRM (Tabela 3.1), que se realizou a marcação dos limites (topo e base) para cada provete, definindo a sua espessura (t') ou o seu comprimento (L). Por fim, os provetes ou blocos foram cortados com as devidas dimensões na serra do Departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL para consequente realização de ensaios laboratoriais. O processo terminou com o alisamento das faces com recurso a lixas, pedra abrasiva ou à serra de precisão. Todo o material foi devidamente descrito em termos litológicos, físicos, da sua dimensão e forma (Apêndice A) e, posteriormente, do ponto de vista microscópico (Apêndice B).

Tabela 3.1 Requisitos das normas ASTM e das recomendações da ISRM para o número mínimo de provetes, forma e dimensão para os ensaios laboratoriais de caracterização de rocha intacta

Ensaio	Recomendações e normas	Nº. mínimo de provetes *	Requisitos estabelecidos	
			dimensão	forma
Porosidade Peso volúmico Massa volúmica	ISRM, 1977	10	$\geq 50g$ ou $\times 10$ máxima dimensão do grão	fragmentos dos provetes ou formas regulares
	ASTM C97/C97M – 09	5	50 – 75 mm; $8\text{ mm} < V/A_{\text{sup}} < 12,5\text{ mm}$	regulares (prismas, cubos, cilindros, etc)
RTB	ISRM, 1978c	10	$\cong D/2$	cilíndrica
	ASTM D 3967-08		$0,2 < t'/D < 0,75$	
RCU	ISRM, 1979	5	$2,5 < h/D < 3$ $D = 10 \times$ máxima dimensão do grão	cilíndrica
	ASTM D 7012 – 07	a definir	$2:1 < L/D < 2,5:1$ $D = 10 \times D$ do maior grão	
RCP	ISRM, 1985	10	$L/D \geq 1$ (teste diametral)	cilíndrica
	ASTM D5731-07	10 (20 para as amostras irregulares)	$0,3 \leq L/D \leq 1$ (teste axial) $50 \pm 35\text{ mm}$ com $0,3 \leq D/w' \leq 1$ (preferencial 1) (teste com blocos/ amostras irregulares)	
*pode ser maior para rochas anisótropas; D – diâmetro; h – altura; t' – espessura; V – volume; L – comprimento; A _{sup} - área superficial; w' – largura;				

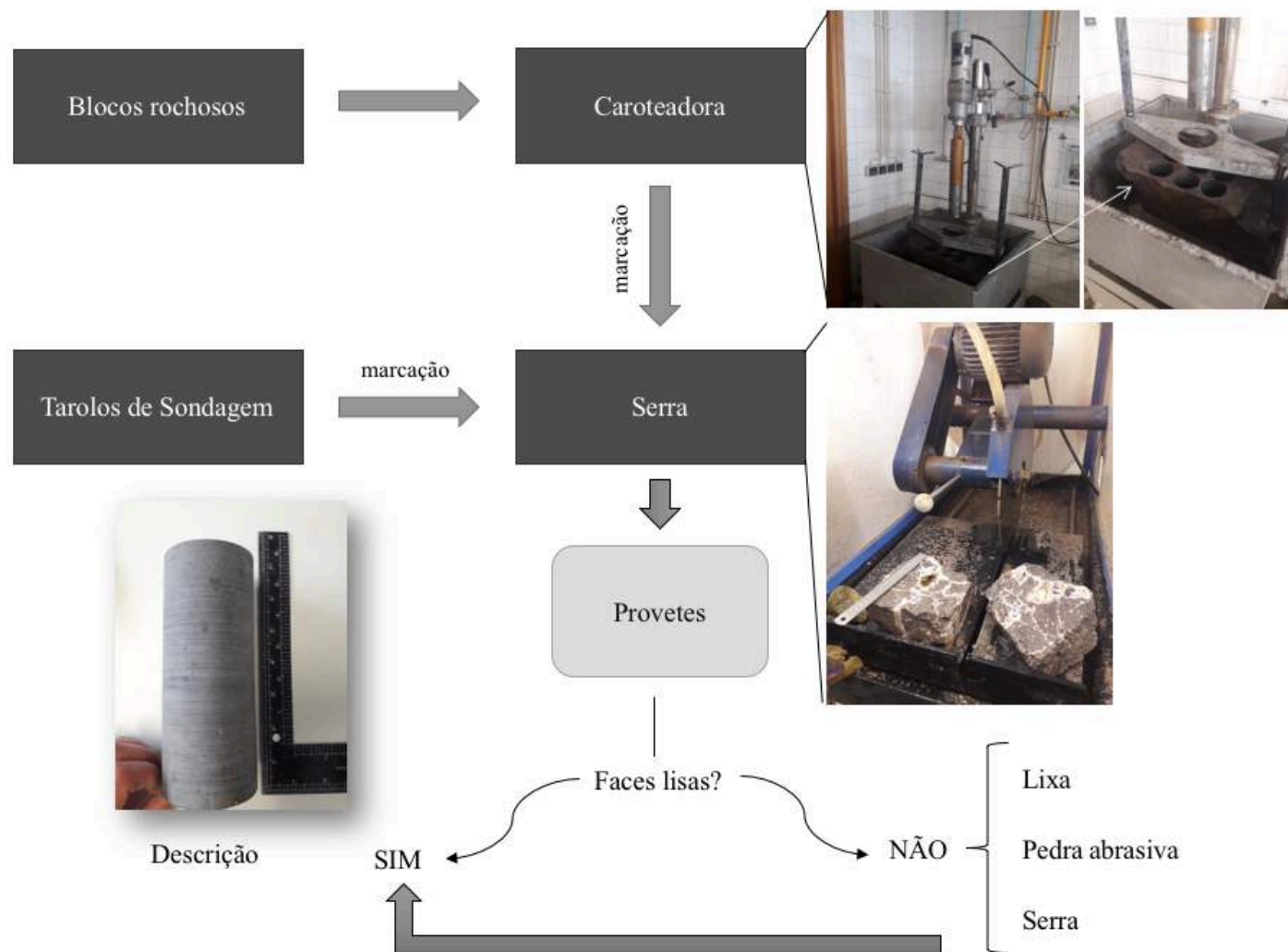


Figura 3.4 Sequência de trabalhos para preparação dos provetes para os ensaios laboratoriais físicos, dinâmicos e mecânicos

3.2.1 AMOSTRAS DO CVL

Amostras BLV

Os basaltos BLV foram amostrados como tarolos de sondagens obtidos no decurso dos trabalhos de prospecção geotécnica realizados para prolongamento da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa, nomeadamente no troço entre a Alameda II e o local onde foi realizado o poço de ataque (situado entre a Rua Marquês da Fronteira, Rua Castilho e Alameda Cardeal Cerejeira). As caixas fornecidas pelo Metropolitano de Lisboa englobam tarolos de sondagens que foram obtidos na estação de S. Sebastião II (linha vermelha), com coordenadas $38^{\circ}44'6,16''\text{N}$ e $9^{\circ}9'7,23''\text{W}$, e no local previsto para o arranque do poço de ataque, bem como entre os dois locais. A maioria das amostras foram retiradas da zona de S. Sebastião II, o que leva a considerar como o principal local de amostragem (Figura 3.5). A data desta remete para a altura dos trabalhos de prospecção geotécnica, em 2001, tendo posteriormente sido armazenados no laboratório em condições controladas. Os basaltos amostrados neste local passam a ser denominados de BLV daqui adiante.

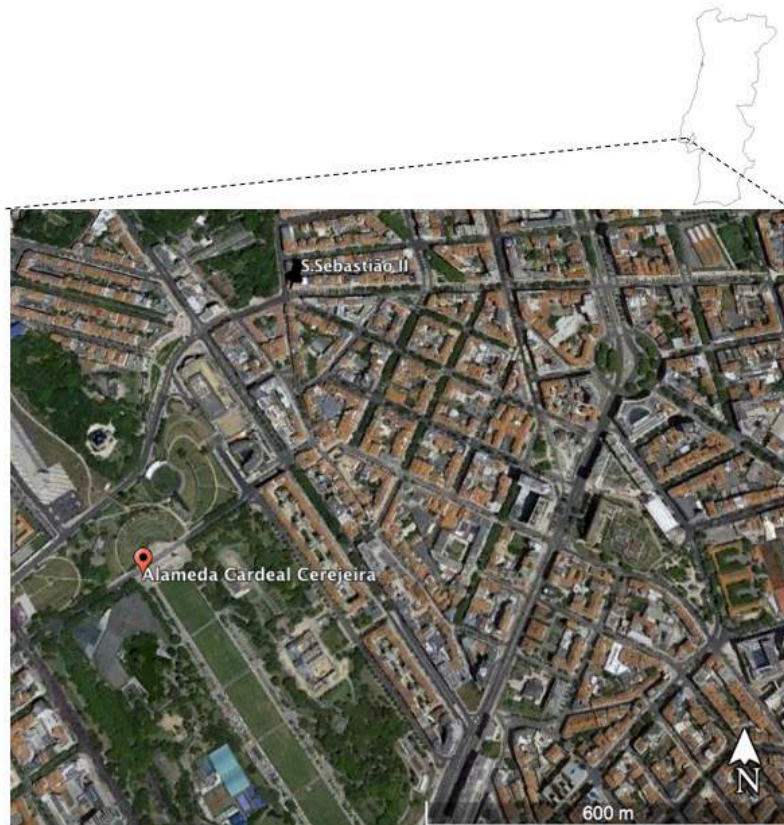


Figura 3.5 Localização do principal ponto de amostragem de BLV

Para estas amostras é difícil estabelecer uma relação de variação linear entre a profundidade e o grau de alteração e fracturação, W e F. Com efeito, apesar de num modo geral serem menores para maiores profundidades, mostram-se muito variáveis quer entre sondagens, quer ao longo de cada sondagem: existem zonas da rocha pontualmente mais meteorizadas e com mais veios e vice-versa. O material foi amostrado de cinco sondagens diferentes, distribuindo-se por diversas profundidades, variando, aproximadamente, entre 11 e 46 m de profundidade. A selecção e a separação por tipos geotécnicos considerando, desta forma, as características específicas de cada trecho de tarolo. As sub-amostras de BLV definem-se na Figura 3.6. O Grupo I inclui basaltos holocristalinos e afaníticos porfíricos. A matriz rochosa tem um baixo grau de alteração, verificando-se alguma oxidação dos

fenocristais e descoloração em torno dos veios, na sua maioria com carbonato e zeólitos ou serpentinizados. O Grupo II inclui material holocristalino e afanítico porfirítico intersectado por uma rede de veios calcíticos em torno dos quais é comum descoloração e oxidação. Os minerais máficos mostram-se mais oxidados (principalmente em rocha W_3) e a matriz encontra-se alterada devido à oxidação e serpentinição, tendo uma cor tipicamente mais acastanhada/esverdeada. Adicionalmente, apresenta uma porosidade em amostra de mão visível e significativa. Além disso, em pequenos trechos, dada a forte fracturação e maior alteração, verifica-se ser mais desagregável. Pode ainda conter cavidades com calcite e zeólitos. Com isto, são amostras para as quais é difícil a obtenção de provetes. O grupo II engloba, assim, dois estados de alteração do basalto, mas um grau de fracturação semelhante – Figura 3.6.

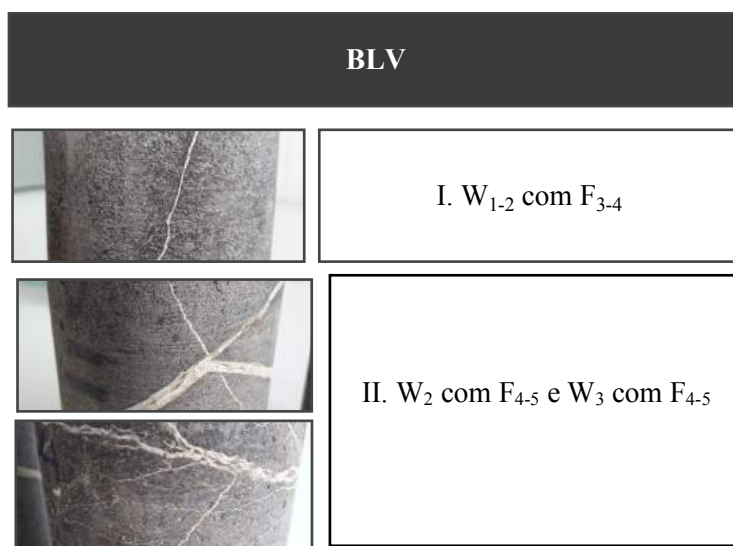


Figura 3.6 Sub-amostras de BLV definidas em função do grau de alteração e fracturação

As amostras de mão (Figura 3.7) apresentam as características descritas em cima na separação dos tipos geotécnicos. A amostra BLVI apresenta apenas um veio calcítico (com zeólito), sendo que estes passam a maior número, com orientação variável, nas restantes 2 amostras. A porosidade aumenta, sendo visível em BLVII.b, onde também ocorrem cavidades com preenchimento similar ao dos veios. A alteração é crescente de BLVI até BLVII.b, marcado pela variação da cor dada a oxidação e possível serpentinição.



Figura 3.7 Amostras de mão de BLV. Da direita para a esquerda: BLVI, BLVII.a e BLVII.b

Amostras BLA

À semelhança dos BLV, estes basaltos também foram obtidos no decurso da execução de tarolos de sondagens para caracterizar do ponto de vista geotécnico os terrenos de interesse para a construção da estação da Amadora Este, Linha Azul, troço Pontinha-Falagueira do Metropolitano de Lisboa. Daqui

adiante serão denominados por BLA e foram obtidos numa única sondagem que atinge 28 m de comprimento e localizada na Figura 3.8, com coordenadas 38°45'33,45"N e 9°13'15,95"W.



Figura 3.8 Localização do ponto de amostragem de BLA

A realização da sondagem com carotagem contínua decorreu em 2001. Posteriormente, o material foi devidamente armazenado em condições controladas. A observação dos tarolos permite concluir que, de forma geral há um incremento de W e F com a profundidade, apesar de pontualmente ocorrerem exceções. À semelhança da amostra BLV, a categorização da rocha intacta tem em conta as características da porção de rocha e não do conjunto amostrado, reconhecendo-se dois tipos geotécnicos principais que estão expressos na Figura 3.9. O Grupo I, amostrado entre 14 e 27 m de profundidade, inclui basaltos com textura holocristalina e afanítica (não se distingue geração porfírica), sendo comum a presença de fissuras fechadas com orientação variável, porém maioritariamente sub-horizontais a inclinadas (30°), e paralelas entre si. São também observáveis veios carbonatados e com zeólito que atravessam o provete com orientações distintas. A rocha apresenta uma descoloração e oxidação que se manifesta principalmente em torno dos veios calcíticos (e com zeólito). Isto confere-lhe uma cor cinzenta, por vezes com laivos acastanhados. O Grupo II, de tarolos amostrados à profundidade entre 7 e 14 m, tem características semelhantes em termos de textura, mineralogia e estrutura. Apresenta, contudo, uma fracturação mais significativa e um tipo de alteração que lhe confere uma cor mais avermelhada a arroxeadada, sendo observáveis núcleos cristalinos que exibem essa mesma cor. Apesar de a alteração se manifestar num grau superior na superfície rochosa, as superfícies frescas de cada tipo geotécnico mostram-se similares. Desta forma, a separação contabiliza a natureza da alteração (apesar de no mesmo grau) e a fracturação.



BLA	
	I. W_2 com F_{3-4}
	II. W_2 com F_4

Figura 3.9 Sub-amostras de BLA definidas em função do grau de alteração e fracturação

As amostras de mão (Figura 3.10) a partir da qual se realizam as lâminas delgadas têm uma descrição litológica semelhante à feita em cima na separação dos grupos de BLA.



Da esquerda para a direita: BLAI e BLAII

Figura 3.10 Amostras de mão de BLA

Amostra BQ

Estes cinco blocos de basalto foram obtidos no talus situado na base de um talude existente na estrada N6-3, em Queijas, junto à entrada para a A5, sentido Lisboa. A localização encontra-se na Figura 3.11 e tem como coordenadas 38°42'43"N e 9°15'54,29"W. Os blocos foram seleccionados tendo em vista a possibilidade de poderem ser manuseados no transporte e no laboratório, tendo estes sido amostrados em Abril de 2018. Além disso, procurou-se um volume de rocha suficiente para cumprir o número mínimo de provetes necessários à execução dos ensaios laboratoriais. A amostra daqui a diante será referida como BQ.



Figura 3.11 Localização do ponto de amostragem de BQ

Não foi possível caracterizar o afloramento do qual os blocos advêm visto localizar-se numa auto-estrada. Procurou-se, antes da realização dos provetes, medir a resistência que os blocos oferecem ao ressalto e só depois foram caroteados com diâmetro superior a NX. Tal como os anteriores, são sujeitos a um corte na serra para obtenção das dimensões especificadas pelas recomendações da ISRM e pelas normas ASTM. Os basaltos aqui amostrados inserem-se num único grupo geotécnico sendo basaltos com W_1 e F_{2-3} (Figura 3.12), tipicamente com textura holocristalina e afanítica porfírica. Apresentam algumas fissuras fechadas e veios calcíticos com zeólitos, onde se verifica uma ligeira descoloração em seu torno. Em termos da sua coloração, são rochas cinzentas, melanocratas.



Figura 3.12 Aspecto de tarolo e amostra de mão de BQ

Tal como anteriormente, escolhe-se uma amostra de mão (Figura 3.12) representativa de BQ para observação das suas características macroscópicas e microscópicas. Esta amostra tem propriedades semelhantes às descritas em cima, acrescentando o facto de ter uma porosidade reduzida e não visível a olho nu.

Amostra BM

Na zona nordeste do parque florestal de Monsanto, recorreu-se a dois locais para a amostragem de rochas basálticas, perfazendo um total de sete blocos. A sua selecção foi feita tendo em conta o volume necessário para obter o número mínimo de provetes para os ensaios e a possibilidade de os manusear no transporte e em laboratório. Adicionalmente, todos os blocos são recolhidos em locais onde é visível o afloramento a que se associam. Note-se que Monsanto tem grande disponibilidade de blocos basálticos, contudo há escassez de afloramentos. Contabilizando o facto da maioria destes blocos terem sido transportados, dificulta concluir sobre o seu local de origem. O ponto 1, com coordenadas GPS $38^{\circ}44'22,56''\text{N}$ e $9^{\circ}10'54,59''\text{W}$, ocorre junto à Avenida 24 de Janeiro, e o ponto 2, situado na Estrada Barcal e com coordenadas $38^{\circ}44'17,14''\text{N}$ e $9^{\circ}11'8,68''\text{W}$, encontra-se bastante distante da primeira estação - Figura 3.13. Os basaltos aqui amostrados, em Abril de 2018, constituem a amostra denominada por BM, sendo que se obtiveram quatro blocos do ponto 1 e três blocos do ponto 2. Apenas foi possível carotear blocos do ponto 1, logo todos os ensaios físicos, dinâmicos e mecânicos referem-se à rocha desta localização. Só o ensaio de dureza ao resalto é efectuado em blocos de ambos os locais.



Figura 3.13 Localização do ponto de amostragem de BM

Após o corte na serra, os provetes foram também caracterizados do ponto vista geotécnico, atribuindo-lhe uma escala de W e F. Estes basaltos têm cor cinzenta e são melanocratas. Apresentam alteração variável entre W_1 e W_{1-2} , contudo na sua maioria W_1 , tendo uma textura holocristalina e afanítica porfírica. É comum a presença de fissuras fechadas que atravessam o provete, que mostram preenchimento calcítico e zeolítico. A alteração é mais intensa junto aos veios, onde a descoloração é mais proeminente. A Figura 3.14 ilustra a amostra de mão que foi escolhida como representativa do grupo, para posterior realização de lâmina delgada nos laboratórios da FCUL. As características referidas são observáveis macroscopicamente, principalmente os veios preenchidos e sinuosos. Verifica-se que apesar da porosidade ser reduzida, existe alguma observável com a lupa. Têm um grau de fracturação F_{2-3} .



Figura 3.14 Amostra de mão de BM

Amostra BA

Estes blocos basálticos foram recolhidos em Alcântara, durante a escavação para a construção do Hospital CUF Tejo, localizado segundo as coordenadas $38^{\circ}42'11,73''\text{N}$ e $9^{\circ}10'25,90''\text{W}$. A sua selecção, tal como nas anteriores, teve em conta a possibilidade de manuseamento no transporte e em laboratório e o volume de rocha necessário para perfazer o número mínimo recomendado pelas normas. Estas serão referenciadas como BA e o local da sua amostragem inclui a Figura 3.15.



Figura 3.15 Localização do ponto de amostragem de BA

Dos sete blocos recolhidos, parte foi cortada na serra numa primeira fase para possibilitar a obtenção de superfícies lisas para realizar medições com o martelo de Schmidt do tipo L (para rochas brandas). De seguida, o corte foi feito até à obtenção de provetes prismáticos irregulares com a finalidade de serem utilizados nos ensaios de laboratório. A caracterização destas rochas encontra-se no Apêndice A, onde se descreve as espécimes sujeitas a cada tipo de ensaios. Para o estudo desta amostra, incluíram-se provetes cilíndricos obtidos da zona mais superficial de uma das sondagens realizadas na sequência dos trabalhos para expansão da Linha Vermelha, donde provém a amostra BLV. Consideram-se estes provetes pelo facto de apresentarem características texturais, mineralógicas e de alteração similares às rochas da amostra BA.

A classificação de BA gerou algumas dúvidas visto que Serralheiro (1978) apresenta a descrição de cortes geológicos nos quais refere a existência de camadas cineríticas de cor avermelhada a rosada,

sendo frequentes as impregnações calcíticas, preenchendo cavidades ou dando-lhe uma textura anastomosada quando em veios preenchidos. Com isto, primeiramente as rochas foram consideradas rochas piroclásticas classificadas, segundo a IUGS e a IAEG, como tufo lítico de lapilli de textura amigdalóide a anastomosada. Contudo, para serem consideradas como rochas piroclásticas, é essencial que a sua textura seja clástica. Em amostra de mão esta não seria improvável, reconhecendo-se núcleos de basalto alterado associados a grãos calcíticos (cristaloblastos) que poderiam resultar de uma agregação do material e não apenas do preenchimento de amígdalas. No entanto, o material poderia apenas ser friável dado o grão de alteração. Foi com recurso à lâmina delgada que foi possível tirar conclusões sobre a natureza desta rocha, pois a textura não é clástica mas sim cristalina, o que a exclui como rocha piroclástica. Efectivamente, neste grupo geotécnico encontram-se basaltos de cor acastanhada e melanocrata com textura hialocristalina e afanítica porfirítica. Essa textura, em função da proporção de amígdalas e veios pode classificar-se segundo três tipos - Figura 3.16. Denominam-se amigdalóides caso as suas cavidades (ou amígdalas) estejam preenchidas por calcite e zeólitos. Contudo, verifica-se em vários provetes que existem veios de grande dimensão, com preenchimento semelhante, que atravessam a rocha individualizando núcleos de basalto com graus de alteração variados, exibindo todos forte oxidação. Nesse caso denominam-se anastomosados. Caso a proporção de amígdalas e veios seja próxima, então os basaltos têm textura amigdalóide e anastomosada. O grau de alteração é W_4 , visto que a maioria da rocha se desagrega mas preserva a estrutura original e apresenta uma cor acastanhada. Os núcleos rochosos não excedem os 40% na rocha. O grau de fracturação corresponde a F_5 , podendo as fissuras apresentar-se fechadas ou preenchidas com calcite e zeólitos. Neste último cenário, os veios podem ter dimensões milimétricas a decimétricas. Adicionalmente, são observáveis cavidades na rocha, a maioria preenchida e algumas contendo geódes.

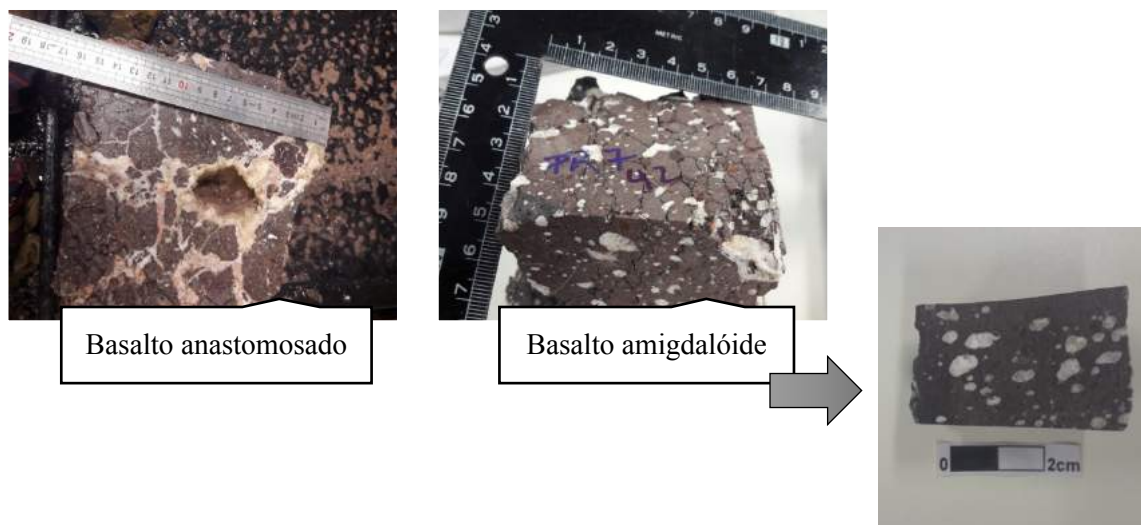


Figura 3.16 Principais dois tipos texturais dos basaltos de Alcântara amostrados e talisca a partir da qual se realizou a lâmina delgada da amostra

A amostra de mão escolhida para a realização da lâmina delgada nos laboratórios da FCUL corresponde a um basalto amigdalóide, sendo que esta apresenta na maioria fissuras fechadas dispostas ao longo de toda a rocha, bem como uma porosidade considerável. Mais raramente, contém veios de espessura milimétrica com calcite e zeólitos

Amostra BV

Soares *et al.* (2002) amostraram basaltos da Pedreira da Moita da Ladra, Vialonga (Vila Franca de Xira), que foram caracterizados em termos mecânicos em laboratório. O local - Figura 3.17, oferece diversas frentes de escavação basálticas, sendo que se pretende complementar o estudo daqueles autores com um levantamento de campo. Este passa pela caracterização de 168 discontinuidades distribuídas

em três estações próximas entre si, com uma localização dada pelas coordenadas GPS 38°53'25,89''N e 9°4'11,65''W. Em função da sua orientação (inclinação e direcção de inclinação), espaçamento (Tabela A.1 dos Anexos), continuidade (Tabela A.2 dos Anexos), abertura (Tabela A.3 dos Anexos), rugosidade ou JRC (Figura A.1 dos Anexos) e preenchimento, são caracterizadas as principais famílias no local. Avaliando, ainda, as condições gerais de percolação da água, bem como estado de alteração do maciço, este é caracterizado do ponto de vista geotécnico com recurso a classificações geomecânicas (RMR, VRS e VRFSR) e ao GSI. A finalidade é concluir sobre as diferenças entre os vários sistemas de classificação usando como estudo de caso o CVL.



Figura 3.17 Localização do ponto de amostragem de BV

Em cada estação é discriminada a altura e o comprimento da secção onde é feito o levantamento de campo (Figura 3.18). Como se pode observar na Figura, a estação 1 apresenta um maciço com basalto subjacente a calcários margosos, verificando-se que na zona central há um forte diaclasamento do maciço. Este não é tão evidente ao longo das restantes estações onde o afloramento passa a ter maior altura. Aponta-se ainda para a verticalização de algumas descontinuidades na estação 3, com elevada continuidade.

O tratamento dos dados das descontinuidades é feito com o Microsoft Excel e com o *software opensource* Openstereo, tal como expresso na Figura 3.3. Os diagramas de isodensidades bem como as rosetas das direcções das diaclases (em azimutes), que podem ser consultadas na secção 4.2.

Estação 1	Estação 2	Estação 3
-----------	-----------	-----------



Figura 3.18 Secções da superfície de escavação alvo do estudo de campo

3.2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Massa volúmica, peso volúmico e porosidade aberta

O estudo no laboratório de Geologia de Engenharia da FCT-UNL destas duas propriedades intrínsecas é feito através da técnica de saturação recomendada pela ISRM (1979b). Tal como aí descrito, a porosidade e o peso volúmico (bem como o teor em água) estão inter-relacionados e têm influência no comportamento mecânico das rochas: uma maior porosidade associa-se a menor peso volúmico, bem como a uma menor resistência e maior deformabilidade (*op. cit.*). Note-se que a existência de microfissuras com dimensão significativa nas rochas em estudo contribuiu para um enviesamento dos resultados, sendo um factor a ter em conta na análise dos mesmos.

Procura-se que o material a ser analisado tenha dimensão suficiente para diminuir possíveis erros associados ao procedimento. Dos fragmentos recolhidos, no mínimo 10 por amostra, certifica-se que a massa é superior a 50 g e a mínima dimensão 10 vezes superior à máxima dimensão do grão (Tabela 3.1), seguindo-se as recomendações da ISRM quanto aos requisitos de dimensão e forma. Para maximizar e acelerar todo o procedimento, seleccionam-se dos vários fragmentos aqueles que têm correspondência aos provetes de RCU e, adicionalmente, outros que se considerem serem representativos das amostras recolhidas do CVL. Complementarmente, estes foram regularizados na serra de corte do departamento para mais fácil disposição no exsicador.

De uma forma sumária, o procedimento é feito segundo a norma BS EN 1936 (2007) e as recomendações da ISRM (1979b). Primeiramente os fragmentos são colocados no exsicador utilizando-se provetas de vidro para impedir o contacto entre os fragmentos (com o fundo e entre eles). O exsicador é devidamente isolado com vaselina e inicia-se o vácuo, sendo que as amostras permanecem sob este durante $2\pm0,2$ h (Figura 3.19). Após esse período, inicia-se a imersão dos fragmentos, também sob vácuo, até todas as porções estarem cobertas por água segundo um período não inferior a 15 minutos. Para o efeito, recorre-se a água destilada à temperatura ambiente ($20\pm5^{\circ}\text{C}$) que é previamente fervida. Adicionalmente, a imersão vai sendo acompanhada com pancadas no recipiente para permitir a expulsão das bolhas de ar da rocha. Após totalmente submersos, deixa-se o vácuo continuar a operar durante pelo menos mais 30 minutos, continuando-se com as ligeiras pancadas. Quando o borbulhar na superfície da água diminui consideravelmente, desliga-se o vácuo e deixa-se o material durante pelo menos 24 ± 2 h à pressão atmosférica (BS EN 1936, 2007). Segue-se a pesagem hidrostática, em que é obtida a massa submersa dos fragmentos através da colocação de cada um no cesto imerso em água destilada e suspenso da balança ($\pm 0,01\text{g}$), como ilustrado na Figura 3.34. Seca-se o excesso de água na superfície com um pano húmido e torna-se a pesar para obter a massa saturada de cada fragmento (*op.cit.*). De seguida, os provetes são secos na estufa ($T= 105^{\circ}\text{C}$) durante um período mínimo de 24h (ISRM, 1979b). O arrefecimento é feito no exsicador durante, pelo menos, 30 minutos e depois novamente pesados para obter a massa seca de cada porção rochosa.

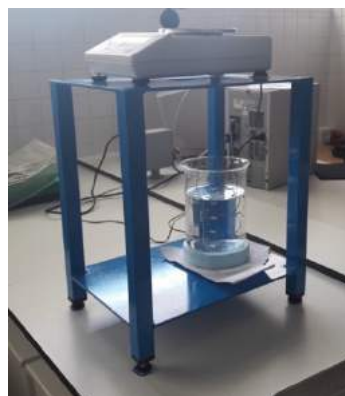


Figura 3.19 Material de laboratório utilizado para a imersão dos fragmentos sob vácuo (esquerda) e para a pesagem hidrostática (direita)

Cada um destes parâmetros permite executar diversos cálculos que culminam na obtenção da massa volúmica (Equação 3.1), do peso volúmico (Equação 3.2) e da porosidade aberta (Equação 3.3) de cada fragmento. Note-se que a massa volúmica determinada é aparente, pois no volume são contabilizados os vazios para além das partículas sólidas. O volume total deriva do princípio de Arquimedes e o volume de vazios do método de saturação em água.

$$\rho_a = \frac{m_d}{m_{sat} - m_{sub}} \quad (3.1)$$

Onde, ρ_a – massa volúmica aparente (kg/m³); m_d – massa do fragmento seco (g); m_{sat} – massa do fragmento saturado (g); m_{sub} – massa do fragmento submerso (g).

$$\gamma = \rho_a \times g \quad (3.2)$$

Onde: γ – kN/m³; ρ_a – kg/m³; g – 9,81 m/s².

$$n_e = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{m_{sat} - m_d}{m_{sat} - m_{sub}} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde: n_e – porosidade aberta (%); V_v – volume de vazios (m³); V – volume total (m³).

Os resultados estão no Apêndice C.1, não se tendo seguido as recomendações da ISRM (1979b) quanto aos arredondamentos. Consideram-se sempre duas casas decimais para melhor se compreender os resultados.

Teor em água

Para a determinação desta propriedade física, recorre-se às recomendações da ISRM (1979b) tal como anteriormente, juntamente com as normas ASTM D2216-05 (2005). O teor em água deve ser determinado imediatamente após a realização de ensaios de RCU e RTB, já que este tem influência no comportamento mecânico do material, devendo-se explicitar as condições de saturação em que se encontra aquando o ensaio.

Para a sua execução, é estabelecido como massa mínima dos fragmentos 50 g pela ISRM (1979b) (ou 10 vezes superior a máxima dimensão do grão) e 500 g pela ASTM D2216-05 (2005). O primeiro valor é mais razoável para os fragmentos obtidos após os ensaios, tendo-se tomado como referência este. Note-se, contudo, que em muito raras vezes, devido à elevada fracturação do material, obtiveram-se massas inferiores, mas muito próximas do valor mínimo. É recomendado que o ensaio seja realizado para, pelo menos, 10 fragmentos. Estes têm de ser, ainda, representativos do conteúdo em água dos provetes que os originaram. O ensaio consiste, primeiramente, na pesagem da porção de rocha natural após a rotura do provete, seguindo-se a secagem em estufa ($T = 110 \pm 5^\circ\text{C}$ ou 105°C) durante pelo menos 24 horas ou até se atingir massa constante. O arrefecimento dos fragmentos é feito no exsiccador durante 30 minutos, culminando com uma nova pesagem que representa a fracção sólida do material rochoso (sem água nos poros). A perda de água que ocorreu durante o processo de aquecimento materializa a diferença entre a massa inicial na rotura e a massa seca, equivalendo à massa de água presente no material. O teor em água consiste na razão entre a massa referida e a massa de partículas sólidas da rocha (Equação 3.4). Os seus resultados devem ser apresentados arredondados a 0,1% tal como sugerido pela ISRM (1979b), contudo opta-se por duas casas decimais nos resultados. Estes são apresentados juntamente com os valores obtidos nos ensaios RTB e RCU na secção 4.1.3.

$$w = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100 = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde: w – %; m_i – massa da rocha antes de ir à estufa (condições naturais) (g); m_d – massa da rocha após secagem (fracção sólida) (g); m_w – massa de água nos poros da rocha (g); m_s – massa das partículas sólidas da rocha (g).

Velocidade de propagação dos ultrassons

Consiste na determinação de V_p e V_s , propriedades dinâmicas descritas anteriormente. No ensaio, a colocação de um transmissor e receptor permite o registo do tempo de chegada do impulso sónico após percorrer uma determinada distância. Em função destas variáveis, calcula-se a velocidade desse impulso (Equações 3.5 e 3.6).

$$V_p = \frac{d}{t_p} \quad (3.5)$$

$$V_s = \frac{d}{t_s} \quad (3.6)$$

Onde: V_p e V_s – m/s; d – distância entre transdutores (m); t – tempo de chegada das ondas longitudinais (t_p) e de corte (t_s) (s)

A sua execução segue a recomendação da ISRM (1978b) (primeiro método) e a norma ASTM D2845-08 (2008). A dimensão lateral mínima (perpendicular à direcção de propagação das ondas) deve ser pelo menos 10 vezes o comprimento de onda (5 vezes para a norma ASTM). A distância percorrida pelas ondas deve ser no mínimo 10 vezes superior ao tamanho médio dos grãos. Desta forma, os provetes de basalto utilizados são os destinados ao ensaio de RCU. No caso de BA, usam-se provetes cilíndricos da mesma litologia, mas obtidos no local de amostragem de BLV. Para os blocos obtidos na sequência da escavação da obra em Alcântara, cortam-se provetes prismáticos na serra, estando descritos no Apêndice A.1.

Para a realização deste ensaio recorre-se a um instrumento para a medição das ondas longitudinais, o PROCEQ PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indication Tester*) LAB V2.4.0 e os transdutores com 54 kHz de frequência e 5 cm de diâmetro. Este permite, para um dado L do provete, obter directamente t_p e V_p . A medição das ondas de corte é feita com recurso a outros dispositivos, os transdutores com 250 kHz de frequência e 3,2 cm de diâmetro juntamente com o equipamento PUNDIT, da empresa C.N.S. *Electronica*. Este mede os tempos de propagação e, posteriormente, calcula-se V_s em função de L . A colocação dos transdutores também difere, sendo que para a medição de V_p estes são postos nos topos opostos do provete (Figura 3.20) e, para V_s , um no topo e outro em cima do provete na extremidade oposta (Figura 3.21). Excepcionalmente, dadas as dificuldades na leitura de V_p para as rochas basálticas de elevada alteração (BA) com o primeiro equipamento, recorre-se ao PUNDIT com os transdutores adequados para a medição das ondas longitudinais (54 kHz e 5 cm de diâmetro). A ligação dos transdutores é auxiliada com gel de ultrassons.

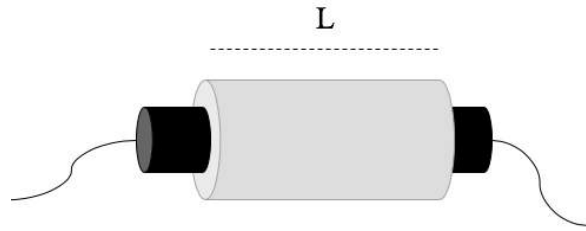


Figura 3.20 Medição das ondas longitudinais e disposição dos transdutores

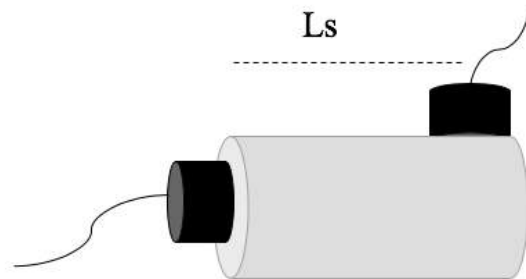
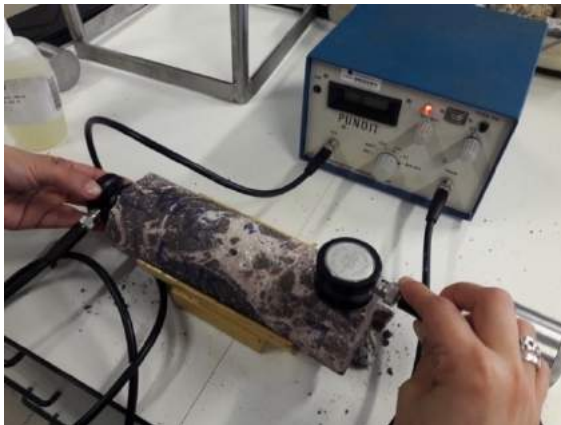


Figura 3.21 Medição de ondas transversais e disposição dos transdutores

A execução do ensaio é realizada, também, de forma distinta. Para as ondas longitudinais e para os provetes basálticos, faz-se uma leitura de V_p dada a maior precisão do equipamento. No caso da obtenção de V_s para estas rochas, uma vez que o equipamento não apresenta tanta precisão, gerando valores continuamente, opta-se por realizar três leituras nos provetes (no caso dos cilindros distadas a 120° cada), sendo que se apresenta o valor da média aritmética de t_s . Para as rochas basálticas de maior alteração (BA), recorre-se apenas ao equipamento PUNDIT dada a elevada heterogeneidade e anisotropia do material. Fazem-se sempre três leituras de t_p e t_s , seguido do cálculo da sua média aritmética e dos valores de velocidade. Por fim, recorrendo às Equações 2.4 e 2.5, obtém-se E_d e v_d . Os valores deste ensaio podem ser consultados no Apêndice C.2.

Dureza ao ressalto

A utilização do esclerómetro permite determinar a resistência que a rocha oferece ao ressalto do martelo de uma forma expedita, podendo ser aplicada em laboratório e em campo, em várias condições. O número de ressalto (R) que aqui é calculado tem uma ampla aplicação em engenharia, como a previsão da capacidade de penetração das máquinas de furação e previsão da erodibilidade hidráulica da rocha. Adicionalmente, também pode ser empregue na cartografia geotécnica e na descrição física de amostras de rocha (ASTM D5873-05, 2005). A utilização do martelo de Schmidt é limitada em rochas muito brandas ou muito duras, com RCU inferiores e superiores a 2 MPa e 100 MPa, respectivamente (*op. cit.*).

O ensaio é conduzido pelas recomendações da ISRM (1978a), incluindo a revisão efectuada por Aydin (2009), e segundo a norma ASTM D5873-05 (2005). No procedimento utiliza-se, exclusivamente, um martelo do tipo L com energia de impacto de 0,735 Nm, e do modelo L -

CONTROLS 45-D561. O equipamento foi usado em laboratório, nos blocos rochosos recolhidos, e *in situ*, no afloramento da Pedreira da Moita da Ladra, efectuando-se uma caracterização expedita da resistência. Em laboratório, os blocos rochosos das rochas BA, dada a sua superfície irregular, foram primeiramente cortados na serra para obtenção de uma superfície lisa e fresca (sem poeiras e menos meteorizada). Os blocos rochosos da amostra BQ e BM apresentam faces relativamente adequadas à aplicação do esclerómetro, por serem poucos irregulares. Em todas as superfícies de ensaio é feito um polimento prévio com uma pedra abrasiva, diminuindo as asperezas e permitindo a actuação do equipamento em zonas livres de irregularidades e poeiras, tal como descrito na norma ASTM D5873-05 (2005). São seguidas as recomendações da ISRM (1978a) e não da ASTM (2005) para as dimensões dos blocos dado o mais fácil cumprimento dos requisitos. Procura-se que os blocos tenham uma espessura medida nos bordos de, pelo menos, 6 cm ou, quando possível, de 10 cm (Aydin, 2009). Na área lisa e, ao longo dessa espessura, o material deve ser intacto (livre de fendas e fissuras), evitando uma quebra nos valores obtidos. Além disso, deve apresentar-se petrograficamente uniforme e representativo do domínio rochoso. De seguida, as amostras foram apoiadas, sempre que possível, numa face plana e paralela colocada sobre uma superfície anti-derrapante e lisa, que visa evitar vibrações e a perda da energia de impacto. Quando necessário, recorreu-se ainda a outros blocos para impedir a movimentação da amostra aquando o ensaio. O martelo de Schmidt é utilizado perpendicularmente às faces lisas, quer na vertical ($\pm 5^\circ$ de desvio face ao eixo desejado) e no sentido para baixo ($+ 90^\circ$), quer na horizontal (0°) (Figura 3.22). No campo, a sua aplicação é feita em diversas orientações (0° , 90° , $+45^\circ$ e -45°).

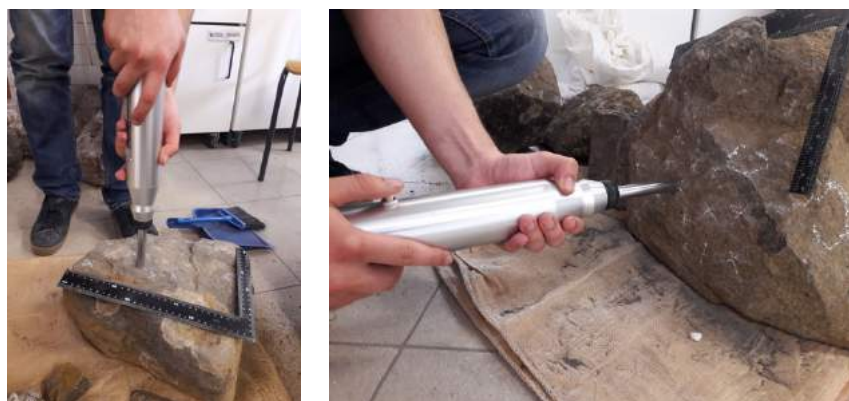


Figura 3.22 aspecto da utilização do esclerómetro nas faces dos blocos em laboratório, na vertical e na horizontal

Nos blocos fazem-se 20 medições por cada superfície distadas pelo menos um diâmetro do espigão entre si e de meio diâmetro do mesmo, face aos bordos (*op. cit.*). Por vezes, devido aos constrangimentos no que toca à dimensão, fazem-se leituras complementares noutra face do mesmo bloco. Ao contrário do que é proposto em ISRM (1978a) e na norma ASTM D5873-05 (2005), nenhum valor medido (a não ser que haja fracturação) deve ser excluído, pois no seu conjunto reflectem a heterogeneidade da rocha e o potencial desvio nas propriedades mecânicas (σ_c e E). As leituras são apresentadas por ordem decrescente (Apêndice C.3) e, quando necessário, são normalizadas à direcção de impacto horizontal (0°) através da correlação gráfica da Figura 3.23, disponibilizada por Aydin (2009). Note-se que as medições não são afectadas pelo factor de correcção, dada a recente calibração do equipamento mesmo antes da execução dos ensaios. No campo, foram feitas medições nas três estações de estudo do afloramento. Nas duas primeiras fizeram-se 20 leituras, enquanto na terceira apenas 12, sendo que os resultados foram analisados tendo este facto em consideração.

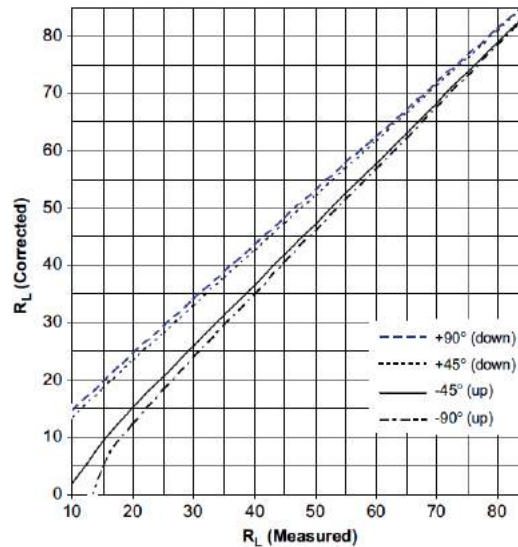


Figura 3.23 Ábaco para normalizar o valor de R à direcção horizontal

O tratamento dos dados envolve, para além da normalização à horizontal, uma caracterização estatística amostral, quer em termos de localização (média aritmética, moda, mediana e quartis), quer da dispersão (desvio-padrão, coeficiente de variação ou CV e amplitude inter-quartis). Evidencia-se que para o cálculo dos quartis se recorre ao algoritmo $(N+1)$, definido pela equação “QUARTILE.EXC” no Microsoft Excel. O intervalo de valores das leituras também é referido (máximo e mínimo), e para mais fácil visualização e percepção da distribuição dos dados, são apresentados os histogramas no Apêndice C.3 para cada amostra do CVL. O valor de R corresponde ao valor médio determinado para cada superfície, excluindo os valores anómalos. Este processo é descrito em maior pormenor na secção 4.1.2. Com efeito, segue-se a abordagem proposta por Aydin (2009), não se excluindo nenhum valor das 20 leituras (ou daquelas válidas) de forma a obter uma representação completa da rocha e da sua heterogeneidade e anisotropia. Contudo, existem diversos factores que podem levar a valores anómalos e que não sejam representativos das características rochosas, devendo ser devidamente identificados.

A lista de factores que tem influência nos resultados é vasta, tendo-se como exemplo a heterogeneidade rochosa, quer no interior da amostra (não perceptível pelo operador) como nas superfícies expostas, o grau de alteração, o teor em água e as condições a que decorre o ensaio. Com efeito, no campo há dificuldade em colocar os blocos numa base lisa e determinar possíveis fissuras ou fendas atrás do ponto de impacto, sendo frequente a obtenção de valores de R mais baixos. No laboratório, ocorrem constrangimentos em termos de dimensão amostral, sendo que os valores têm de ser analisados em função da geometria e da escala do bloco (Aydin, 2009). Estas duas últimas características têm particular relevância para as amostras de BM e BQ em estudo. Apesar de se procurar sempre faces lisas e planas que são polidas antes do ensaio, a irregularidade destas permanece. Isto conduz a que, usualmente, se obtenha valores de R menores nas proximidades dos bordos ou em zonas de maior irregularidade que pode interferir com a direcção de impacto do pistão do martelo. Para o caso destas amostras, e pelo facto de não terem sido cortadas na serra, há especial cuidado na determinação de valores *outlier* que não espelhem verdadeiramente a heterogeneidade da rocha. Para o caso das rochas basálticas amigdalóides (BA) não se coloca o problema da irregularidade das faces já que estas foram obtidas através de corte com serra. Porém, a heterogeneidade evidencia-se ao nível da mineralogia e da textura, podendo existir diferenças no R entre os núcleos líticos e os veios e amígdalas de calcite e zeólito. Referencia-se ainda a dificuldade em encontrar superfícies livres de fendas nesta rocha, sendo provável um forte contributo destas nos valores de R . Dado estes factores, a determinação de *outliers* nestas rochas mostra-se, igualmente, necessária.

O cálculo destes valores anómalos é realizado com recurso a diferentes métodos. Um deles segue a descrição feita por Goktan & Ayday (1993) onde o critério de Chauvenet, um caso especial da distribuição *t-student*, é aplicado para rejeitar valores desajustados. Com efeito, averigua-se qual o desvio dos valores dos extremos (máximo e mínimo) face à média e calcula-se o rácio entre esse desvio e o desvio-padrão. As leituras são rejeitadas caso, para um dado n (número de indivíduos) e p (obtido na Tabela C.1 do Anexo C para o valor de n), o rácio dê superior ao *p-value*. Note-se, contudo, que este critério tem algumas desvantagens visto que assume que a distribuição dos dados é normal, o que não se verifica nos histogramas apresentados no Apêndice C.3. Além disso, apenas deve ser aplicado uma vez de forma a não gerar aquilo que são chamados “shielded outliers”. Complementarmente, recorre-se ao critério de Pierce que frequentemente é sugerido como alternativo ao primeiro e descrito em maior pormenor por Ross (2003). Este também se baseia no valor médio e no desvio-padrão de cada conjunto de dados, a partir dos quais se obtém a variável R_p obtida na Tabela C.2 do Anexo C. É um método iterativo uma vez que vai aumentando o número de observações suspeitas, e em cada iteração calcula-se o máximo desvio possível e compara-se com o desvio face à média dos possíveis *outliers*. A exclusão do valor faz-se caso o desvio do valor suspeito for superior ao máximo desvio admitido e se ocorrer rejeição, volta-se a repetir o processo considerando agora duas observações suspeitas e assim por diante. A maior desvantagem reside no facto de ser um método mais moroso mas é mais rigoroso face ao critério de Chauvenet, uma vez que não faz suposições arbitrárias relativamente à rejeição de dados. Pode, também, ser aplicado para os casos em que há mais do que um valor “suspeito”. Por último, recorre-se ainda a um terceiro método que se baseia nos quartis de 25% (Q1) e 75% (Q3) e no cálculo dos intervalos onde possíveis *outliers* podem cair, tendo-se apenas determinado os *outliers* de 1ª espécie. Os resultados deste método podem ter como auxiliar gráfico os vários box-plots apresentados no Apêndice C.3. Pretende-se tirar conclusões sobre os resultados, com e sem os valores anómalos.

3.2.3 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Resistência à compressão uniaxial

Esta é uma importante propriedade índice que tem grande utilidade na engenharia geológica, tendo como finalidade mimetizar as condições de tensão a que uma rocha é submetida *in situ*. Acresce a possibilidade de medir a deformação do provete aquando o ensaio, com consequente cálculo do E e ν (estáticos). Contudo, existem uma série de factores, descritos na secção 2.2.2., que demonstram que a extrapolação dos valores obtidos na rocha intacta para o maciço está afectada por um erro significativo, devendo esta ser feita com as devidas reservas.

Os provetes obtidos têm diâmetro (D) superior a 54 mm tal como especificado pela norma ASTM D7012-07 (2007) e pelas recomendações da ISRM (1979a). O seu comprimento (L) é definido como 2 a 3 vezes superior ao diâmetro, tendo-se feito a marcação dos provetes de forma a que essa razão seja na ordem dos 2,5 vezes para estar concordante com os dois documentos. O corte na serra leva, frequentemente, à presença de irregularidades junto aos bordos nas faces dos provetes cilíndricos. Como tal, foi utilizada pedra abrasiva e lixa nessas faces de forma a tornar planas ou reduzir as asperezas até cerca de 0,02 mm (ISRM, 1979a) para garantir uma correcta realização do ensaio, sem concentrações de tensões em determinados locais do provete. A serra não é utilizada nesta etapa para evitar a possível perda de provetes. Importa também salientar que, ao longo do comprimento dos provetes caroteados em laboratório, é comum a existência de irregularidades que derivam do processo, sendo devidamente identificadas e garantindo-se que são inferiores a 0,3 mm tal como recomendado. Considerou-se como número mínimo de provetes 5. Antes da fracturação da rocha para determinação do σ_c , é, primeiramente, feita uma caracterização de todos os provetes destinados a este ensaio em termos de dimensão e descrição litológica (Apêndice A.2), acompanhado de fotografias representativas. A medição do diâmetro no topo, a meio e na base do provete é realizada segundo duas medições distadas a 90°, fazendo-se a média das leituras. O diâmetro do provete é considerado ser a média aritmética das leituras feitas nas três posições (arredondado a 0,1 mm tal como sugerido pela ISRM, 1979a). O comprimento resulta da média de três leituras distadas, aproximadamente, a 120° (arredondado a 1,0 mm tal como sugerido pela ISRM, 1979a). As amostras de basalto ensaiadas encontram-se na Figura 3.24.

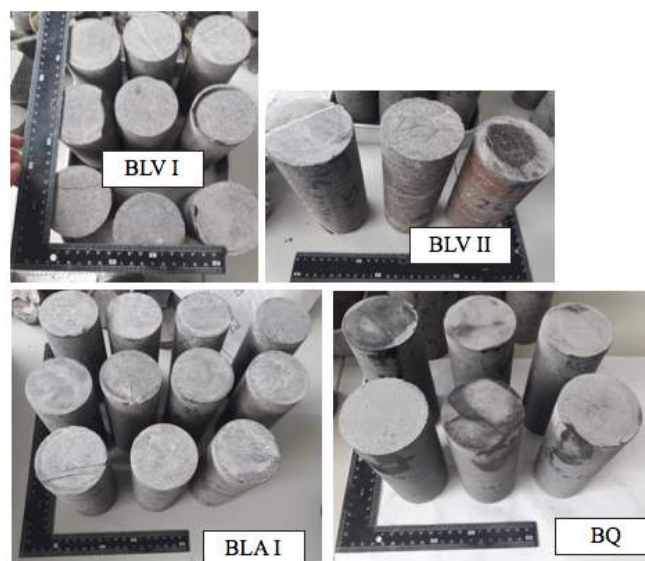


Figura 3.24 Provetes de basaltos ensaiados no ensaio de RCU

O ensaio é feito usando a prensa Seidner da FORM+TEST (D-88449 Redlingen) - Figura 3.25, do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. É servo-controlada e faz-se a marcação dos pratos para garantir a centragem dos provetes. A medição das deformações é feita por transformadores de diferencial variável linear (LVDTs). A deformação axial obtém-se a partir de 4 LVDTs colocados na vertical e em contacto com os pratos, enquanto a deformação lateral é medida por 3 LVDTs posicionados, aproximadamente, a 120° entre si e a meia altura do provete.

O procedimento consiste na colocação do provete entre os pratos da prensa e posterior aplicação de carga, de forma contínua e de forma a produzir uma taxa de carregamento ou deformação constante. Esta deve ser de tal ordem que a resistência de pico ocorra entre um período de 5 a 10 min (ISRM, 1979a) ou 2 a 15 min (ASTM D7012-07, 2007). Segue-se o último intervalo por ser mais alargado. A taxa de carregamento, em mm/s, é definida em função da dimensão dos provetes e do seu grau de fracturação e alteração, garantindo que a rotura ocorre no intervalo de tempo definido.



Figura 3.25 Prensa e LVDTs utilizados no ensaio de RCU

Quanto aos resultados, obtém-se os valores, em função de tempo, dos deslocamentos impostos aos LVDTs (em mm) e da força ou carga (P em kN). Estes são convertidos e resumidos em gráficos de

tensão-extensão (Apêndice D.1) nos quais se representa a tensão (Equação 2.8) em função da extensão axial (Equação 3.7), lateral (Equação 3.8) e da extensão volumétrica (Equação 3.9).

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta D}{D} \quad (3.8)$$

$$\Delta V = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l \quad (3.9)$$

Onde: ε_a – extensão axial; ε_l – extensão lateral; ΔV – extensão volumétrica

O cálculo de E e ν segue diversos métodos especificados na ISRM (1979a) e ASTM D7012-07 (2007), estes resumidos na Figura 3.26. O seu cálculo varia consoante o tipo de material em estudo, sendo que para rochas anisótropas devem-se obter os diversos módulos. O E_{secante} é mais adequado para uma situação de plasticidade, enquanto o E_{tangente} para um cenário de elasticidade. O ν é calculado de forma semelhante aos módulos de Young, relacionando a extensão lateral com a longitudinal.

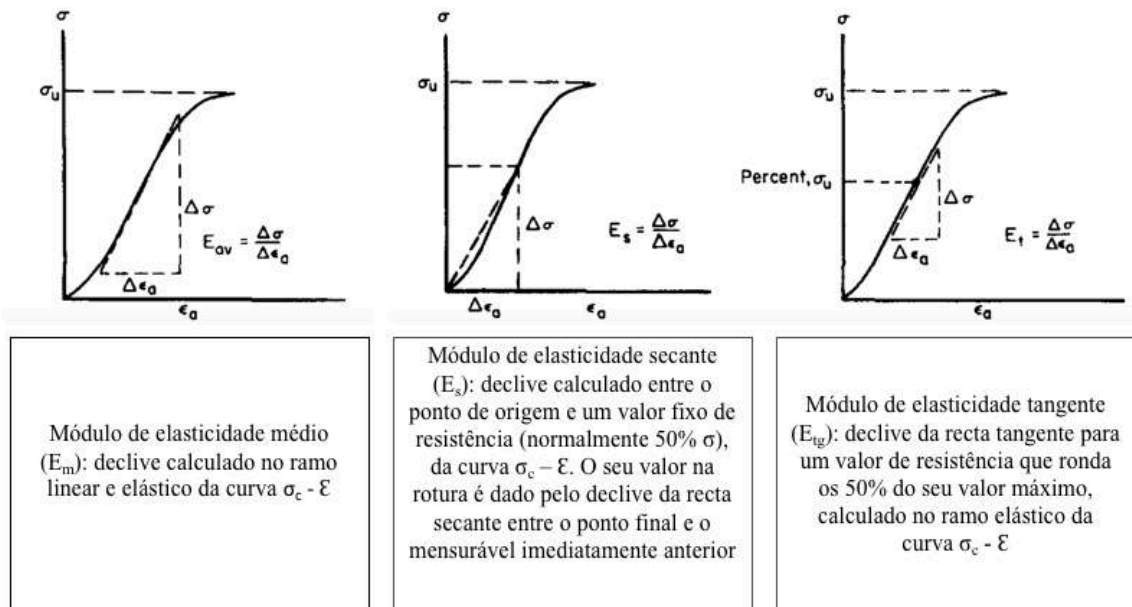
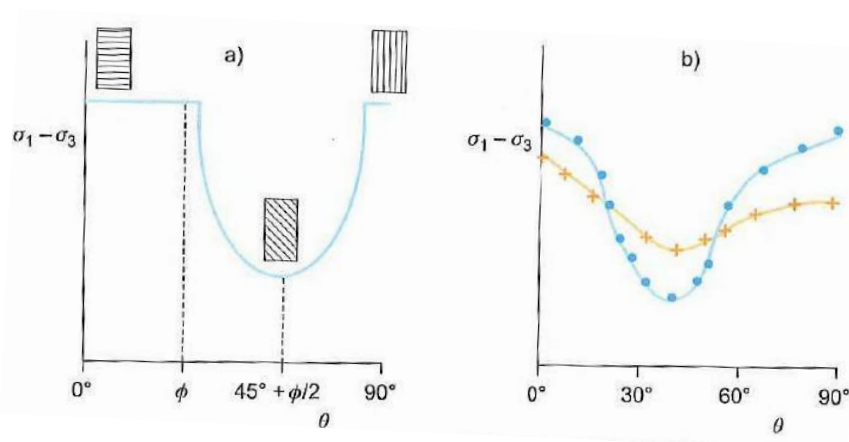


Figura 3.26 Métodos para obtenção de módulos de Young

Existem diversos factores descritos em 2.2.3 que devem ser tidos em conta na interpretação dos resultados de RCU. Dada a sua importância, refere-se a descrição sumária apresentada por González de Vallejo *et al.* (2004) relativa aos parâmetros associados às condições de ensaio. A forma e o volume do provete, nomeadamente a relação L/D , influenciam os resultados dado os efeitos de fricção entre o provete e as placas de carregamento da máquina de ensaio. Quanto maior a esbelteza, menor σ_c . A preparação e o corte das espécies também têm relevância, devendo-se obter topos de provetes livres de irregularidades para evitar a concentração de tensões indesejadas durante o ensaio. Quanto maior o paralelismo entre os topos, menor é o efeito de concavidade (que se observa no início da curva tensão-extensão). A direcção de aplicação de carga relaciona-se com as características de anisotropia e heterogeneidade do material, sendo importante no caso de estudo. Com efeito, a resistência varia consoante a direcção de carregamento face aos planos de fraqueza, sendo que a mínima resistência dá-se quando esse ângulo varia entre os 30° e os 45° e a máxima para ângulos de 0° ou 90° (Figura 3.27).

Por fim, a velocidade de carregamento deve ser tal que evite roturas violentas e consequentes resistências de pico sobrestimadas do material.



a) variação não uniforme das tensões para diferentes ângulos de discontinuidades
b) curvas obtidas através de ensaios em provetes para diversos ângulos

Figura 3.27 Variação da resistência à compressão em função dos planos de xistosidade e fraqueza (González de Vallejo *et al.*, 2004)

Complementarmente, é avaliado o modo de rotura do provete, visto que este espelha a influência das microfissuras e sua propagação na resistência mecânica do material. A sua determinação pode explicar, possivelmente, a gama de valores obtidos no ensaio RCU. Neste, o processo de rotura inicia-se com a redistribuição das tensões em torno de defeitos do provete à medida que se incrementa a força compressiva. Nos pontos em que ocorre a concentração das tensões, dá-se a nucleação das fissuras (abertura por tracção) com consequente propagação das mesmas ao longo da máxima direcção principal, σ_1 , (Szwedzicki, 2006). A rotura pode ocorrer por tracção ou de forma extensional, por cisalhamento ou por combinação das duas, dependendo da orientação da anisotropia e das heterogeneidades, da distribuição das tensões, das faces dos provetes, seu paralelismo e do atrito que se estabelece entre estes e os pratos (ou pratos falsos) da prensa e do efeito escala (*op. cit.*). Szwedzicki (2006) e Basu *et al.* (2013) apresentam possíveis modos de rotura, tendo-se seguido a nomenclatura proposta pelo primeiro autor (Figura 3.28). A fracturação por extensão simples é rara e aponta para uma amostra livre de micro-defeitos e de resistência elevada – rocha dura. A rotura em extensão múltipla é descrita por fissuras paralelas e que se desenvolvem axialmente no provete. A fracturação múltipla conduz à desintegração do provete segundo variados planos, normalmente associada à forte libertação de energia acumulada. Quando a tracção é o modo de rotura predominante, desenvolvem-se planos verticais e perpendiculares, enquanto que as forças de cisalhamento conduzem a fissuras oblíquas e a intersectar a meia altura do provete. O cisalhamento múltiplo é caracterizado por dois planos oblíquos intersectantes, onde a fracturação produz poeiras. O cisalhamento simples, que leva à geração de um plano de rotura único e oblíquo no provete, pode corresponder tanto a planos de fraqueza existentes na rocha como ao carregamento não uniforme sobre a amostra, associando-se a menores σ_c . A rotura por cisalhamento é predominante no ensaio RCU e tende a representar uma resistência que espelha as propriedades das discontinuidades, enquanto a rotura extensional, em regra, associa-se à resistência da rocha intacta (Szwedzicki, 2006).

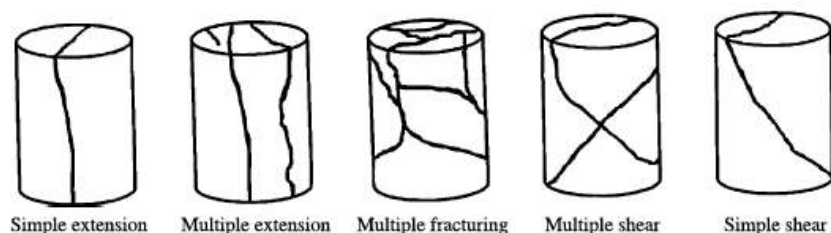


Figura 3.28 Modos de rotura no ensaio RCU (Szwedzicki, 2006)

Os resultados deste ensaio podem ser consultados no Apêndice D.1

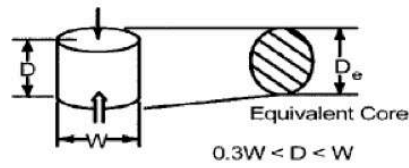
Resistência à compressão pontual

A resistência à compressão pontual (RCP) é obtida através do ensaio com o mesmo nome, que aplica uma carga concentrada, em ponteiros, ao provete onde se sujeita a um espécime a uma carga concentrada que incrementa ao longo do tempo até ocorrer a rotura do material.

Como referido na secção 2.2.4, o RCU é um ensaio dispendioso em termos económicos e de tempo, exigindo preparação de amostras segundo requisitos muito restritos. O ensaio RCP surge como alternativa, consistindo como um ensaio índice para a classificação da resistência dos materiais. Com efeito, as espécies podem ser cilíndricas (para os testes diametral e axial), blocos regulares (teste de bloco) ou fragmentos irregulares (teste com blocos irregulares), não exigindo uma preparação de provetes rigorosa. Este ensaio é particularmente importante para as rochas basálticas BA, onde a preparação de provetes se mostra difícil.

A realização deste ensaio é feita de acordo com as recomendações da ISRM (1985) e com a norma ASTM D5731-08 (2008), fazendo-se o teste axial para os provetes basálticos e o teste em amostras irregulares para os basaltos amigdalóides. No primeiro, e para cada amostra e cada grupo amostral, cumpre-se como número mínimo 10 provetes, sendo que as dimensões são semelhantes às exigidas para o ensaio RTB, isto é, uma relação de espessura de $1/2D$, incluído no intervalo sugerido $1/3 < L/D < 1$. Para estes provetes, houve também a preocupação de alisar os topos com pedra abrasiva e, quando necessário, com a serra de menores dimensões para evitar concentrações de tensões indesejadas. Contudo, a preparação não foi tão exigente como aquela para o ensaio de resistência à tracção brasileiro. Para as rochas amigdalóides e anastomosadas é sugerido um número mínimo de 20 espécies (ASTM D5731-08, 2008). Apesar da sua difícil preparação, utiliza-se a serra para obter blocos com tamanho 50 ± 35 mm com pelo menos duas faces paralelas onde será aplicada a carga concentrada e com rácio diâmetro/largura (D/w') entre $1/3$ e 1 . A distância de uma face livre ao ponto de contacto (L') é de pelo menos $0,5w'$. Sempre que possível, procura-se cortar as amostras de forma a que essa razão seja unitária, tal como sugerido. Todos os provetes foram descritos no Apêndice A.3, onde para os provetes basálticos de melhor qualidade se faz uma só medição de diâmetro e de espessura para cada espécie. Para a amostra BA mede-se a largura, $w'1$ e $w'2$, com cálculo posterior de w' através da média aritmética. O formato para estes dois testes e os requisitos de dimensão estão representados na Figura 3.29 e o material ensaiado na Figura 3.30.

Basaltos



Basaltos amigdalóides e anastomosados

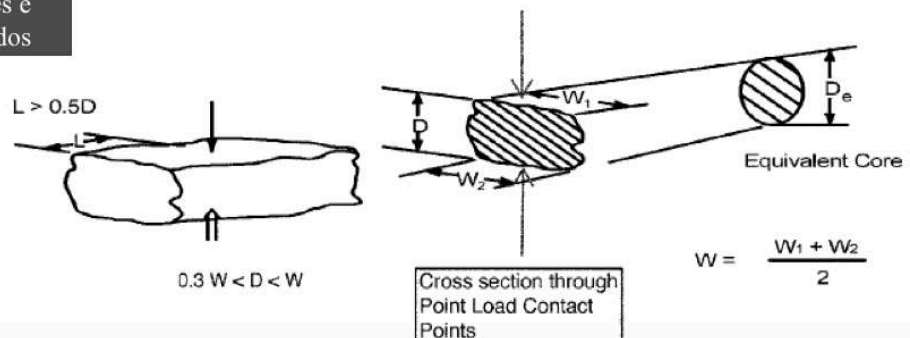


Figura 3.29 Tipos de testes realizados no ensaio de RCP (adaptado de ISRM, 1985)

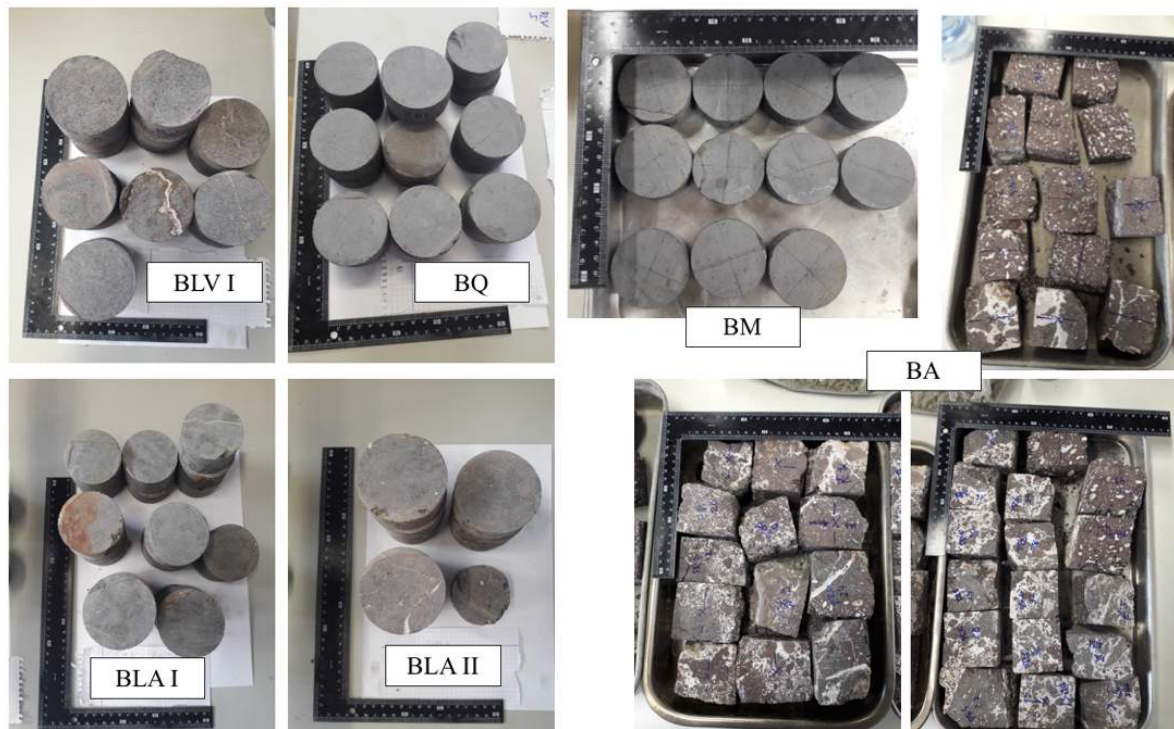


Figura 3.30 Provetes de basaltos ensaiados no ensaio de RCP

Após a descrição de todos os provetes e a sua preservação em ambiente controlado no laboratório, com condições de saturação “seco em laboratório”, começa-se o ensaio. Usa-se o equipamento MATEST com capacidade de 56 kN e nº. de série P01.08 - Figura 3.31. A espécime é colocada entre as duas estruturas cónicas e inicia-se a compressão pontual segundo uma taxa de carga incremental,

sendo que a rotura tem de ocorrer entre os 10 aos 60 s. Em função do modo de rotura, tem de se verificar se o teste é válido ou não, estando essas condições presentes na Figura 3.32. A validade para o teste em blocos foi extrapolada para as espécies irregulares.



Figura 3.31 Equipamento MATEST com capacidade de carregamento de 56 kN

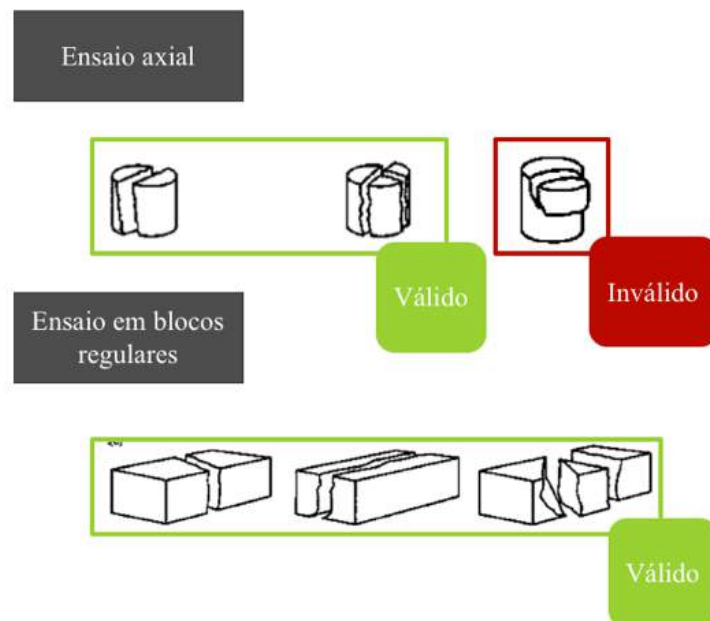


Figura 3.32 Validade dos testes realizados no ensaio de RCP (adaptado de ISRM, 1985)

Tanto a ISRM (1985) como a ASTM D5731-08 (2008) sugerem que para rochas anisotrópicas se usem sub-amostras para determinar a resistência máxima e mínima em função dos planos de anisotropia. Os basaltos W₄ (BA) apresentam-se com diversos veios e/ou amígdalas, segundo variadas orientações. Isto impossibilita a realização de testes onde se especifique a direcção de carga face aos planos de fraqueza. Nestas rochas procura-se, assim, ensaiar as superfícies mais adequadas (dada a irregularidade dos provetes) e para o maior número de amostras possível para melhor contemplar a heterogeneidade destas amostras.

Para cada teste obtém-se a força para a qual se dá a rotura (P), em kN. No registo dos resultados são ainda especificadas a descrição sumária das condições de saturação das amostras (Apêndice D.2). O índice de compressão pontual não corrigido (I_s) é obtido através da Equação 2.6, para qual D_e é dado pela Equação 3.10 já que os testes em causa são o axial e o de amostras irregulares. Este depende do cálculo da área descrito na Equação 3.11.

$$D_e^2 = 4 \frac{A}{\pi} \quad (3.10)$$

$$A = WD' \quad (3.11)$$

Onde: D_e – mm; A – área de secção mínima do plano entre os pontos de aplicação de carga (mm^2); w' – largura do bloco irregular ou diâmetro do provete cilíndrico para ensaio axial (mm) (ver Figura 3.29); D' – espessura da secção entre os pontos de aplicação de carga ou espessura do provete cilíndrico do ensaio axial (mm) (ver Figura 3.29);

O I_s varia em função de D_e nos ensaios axial e de blocos irregulares. Sugere-se a aplicação de uma correcção de tamanho já que os valores da espessura variam de espécie para espécie. Consiste, assim, numa normalização dos valores para uma mesma dimensão, neste caso a obtenção de um índice que teria sido medido num teste diametral para um provete com $D = 50$ mm. Pelo facto de para cada amostra haver homogeneidade em termos de D_e , opta-se por fazer a correcção através de um factor de correcção de tamanho (FC) que é descrito pela Equação 3.12. A partir deste, calcula-se o $I_{s(50)}$ (Equação 3.13).

$$FC = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (3.12)$$

$$I_{s(50)} = FC \times I_s \quad (3.13)$$

Onde: FC – factor de correcção do tamanho; $I_{s(50)}$ – índice de carga pontual corrigido a $D = 50$ mm (que seria medido para um teste diametral) (MPa);

No Apêndice D.2 apresentam-se os vários resultados segundo a ficha aconselhada pela norma ASTM D5731-08 (2008) e pelas recomendações da ISRM (1985). Estes são acompanhados pelo registo fotográfico para evidenciar o tipo e local da rotura. Esta foi classificada de acordo com a nomenclatura proposta por Basu *et al.* (2013), onde para os tipos de rocha em questão se reconhecem três tipos de rotura: plano singular, junção tripla e irregular - Figura 3.33, sendo que a primeira consiste numa rotura planar ao longo do plano de carregamento, a segunda numa rotura dividindo o provete em três partes iguais. A rotura irregular assemelha-se à rotura singular, mas é comum a parte menor do provete fracturar ou a superfície não ser tão planar. Verifica-se, apenas pontualmente, que a rotura pode ser múltipla, isto é, com vários planos singulares no provete.

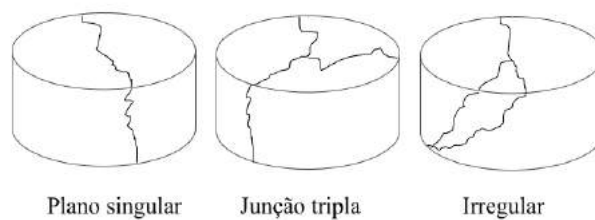


Figura 3.33 Modos de rotura observáveis nas rochas basálticas

Resistência à tracção indirecta

Tal como antes referido, opta-se pelo ensaio brasileiro (RTB) em vez do ensaio de tracção directa, pela sua maior simplicidade e economia. A existência de campos de tensão complexos onde, frequentemente, há uma combinação de tensões compressivas e tractivas, leva à necessidade de determinar o σ_t das rochas. Isto favorece a ampla realização deste ensaio (ASTM D3967-08, 2008).

Para a sua execução seguem-se as recomendações da ISRM (1978c) e a norma ASTM D3967-08 (2008). O objectivo é medir a resistência à tracção de forma indirecta, isto é, através da aplicação de um campo de forças biaxial onde a acção principal é traccional e associa-se a uma outra compressiva, de menor magnitude. O ensaio requer provetes cilíndricos com diâmetro não inferior a NX (54 mm) e uma espessura que se opta ser na ordem de $\frac{1}{2}$ D. Para cada amostra, sempre que possível a execução do ensaio, utilizam-se um número mínimo de 10 provetes (Tabela 3.1). Alguns provetes, após o corte na serra, apresentam irregularidades nas faces junto aos bordos, sendo que a sua remoção foi feita com o auxílio da serra, de pedra abrasiva e de lixa até se garantir serem inferiores a 0,25 mm tal como recomendado pela ISRM (1978c). Por vezes, a sua superfície perimetral apresenta marcas resultantes da carotagem. Garante-se, contudo, que estas não excedem os 0,50 mm tal como descrito na norma ASTM D3967-08 (2008). Adicionalmente, todos os provetes são descritos do ponto de vista da litologia e características físicas, do diâmetro (média de pelo menos três medições) e da espessura (média de pelo menos três medições), estando tal presente no Apêndice A.4. Os provetes destinados ao ensaio são ilustrados na Figura 3.34.

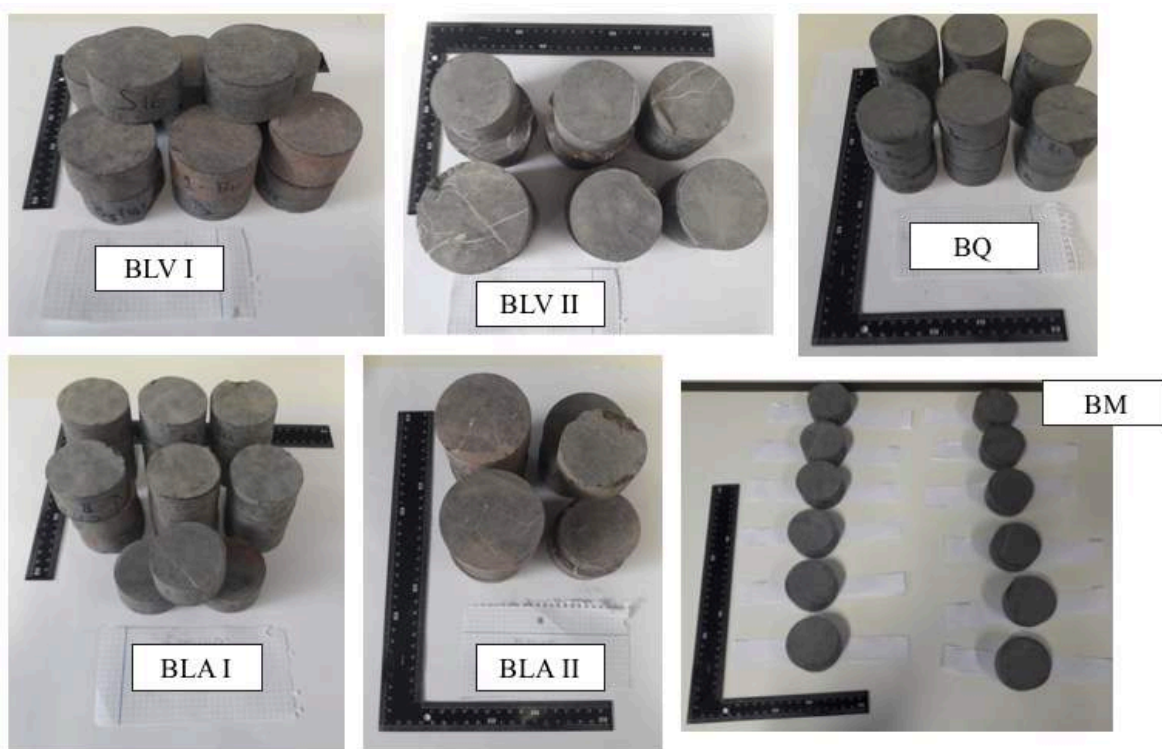


Figura 3.34 Amostras testadas no ensaio brasileiro

Para a execução deste ensaio recorre-se a dois equipamentos distintos. A maioria dos provetes, com diâmetro inferior a 80 mm, foram ensaiados na prensa do laboratório de Geologia de Engenharia (FORM + TEST SEIDNER da Perta). A prensa - Figura 3.35, tem duas placas circulares paralelas entre si que vão exercer a pressão sobre o provete. Esta não é feita de forma directa mas em placas resistentes que têm perímetro circular similar. O conjunto é devidamente centrado para uma correcta aplicação de carga. A segunda prensa (prensa ZWICK/Z050) - Figura 3.36, do Departamento de Engenharia Civil, contém duas placas paralelas quadrangulares. Esta é utilizada para os provetes com diâmetro superior

a 80 mm visto não caberem na estrutura que envolve os provetes da outra prensa. Tal como anteriormente, a aplicação da carga não é imposta directamente nas amostras, mas sim em estruturas de madeira acopladas aos pratos para evitar a concentração de tensões. Ambos os métodos de ensaio estão de acordo com as normas ASTM D3967-08 (2008). É de referir que, com base na experiência, a utilização destes dois métodos de montagem distintos não leva a variações significativas nos resultados. Estas decorrem quando há um contacto directo entre as placas da prensa e o provete. Todas as espécies ensaiadas, independentemente da prensa, foram envolvidas, ao longo do perímetro e espessura, por uma folha de papel para permitir uma distribuição das tensões (ISRM, 1978c).



Figura 3.35 Prensa de compressão do departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL

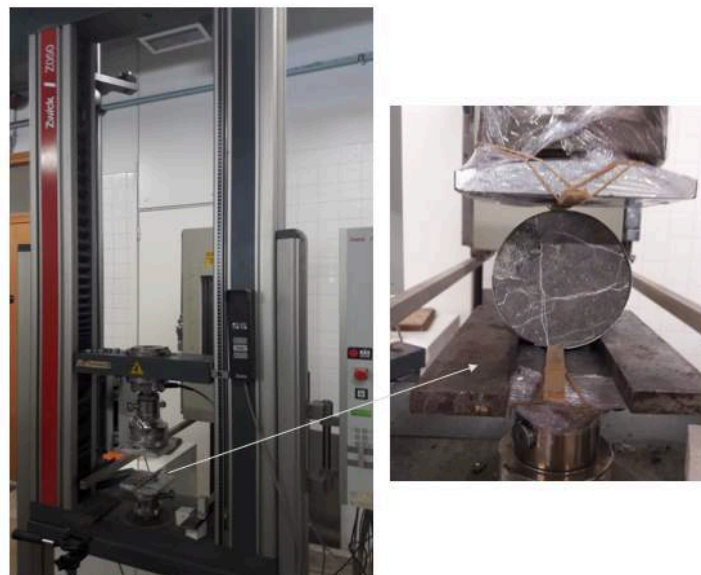


Figura 3.36 Prensa de compressão do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL

As taxas de carregamento descritas na norma ASTM D3967-08 (2008) diferem das das recomendações da ISRM (1978c). Adota-se a descrição feita para a primeira, já que se evita o efeito de carregamento rápida. Como tal, a força compressiva é aplicada continuamente com taxa constante (0,05 – 0,35 MPa/s) até se atingir a rotura por tracção, que ocorre entre 1 a 10 minutos, preferencialmente entre 1 a 3 minutos, para uma determinada força de carregamento (P). Note-se que as taxas de carregamento, nomeadamente a sua nomenclatura, são distintas para cada uma das prensas

em uso. Na primeira referida, os valores de carregamento não têm unidades. Antes da realização de cada ensaio recorre-se a provetes teste para verificar qual a melhor taxa em função do diâmetro e características litológicas e físicas do provete. Para as amostras em causa, usam-se taxas entre 2,6 e 2,8, onde provetes de melhor qualidade e menor diâmetro são ensaiados a taxas maiores, e os de maior diâmetro e pior qualidade a taxas menores. Para a segunda prensa a taxa de carregamento vem em mm/min, sendo que esta foi ajustada experimentalmente com a sucessão de ensaios. Recorre-se a taxas menores para os provetes de pior qualidade (0,4 e 0,6 mm/min) e maiores (1,2 mm/min) para os menos alterados. Uma vez que as unidades das taxas variam entre prensas e também destas para as normas, nos resultados (Apêndice D.3) apresenta-se uma “taxa de carregamento” que não é a real. Esta consiste no quociente entre σ_t e o intervalo de tempo do ensaio (desde o início até à rotura do provete para o máximo P), em MPa/s. A finalidade é ter um termo de comparação com a taxa de carregamento definida na norma ASTM D3967-08 (2008), de forma a verificar se a velocidade aplicada é adequada aos provetes.

O cálculo da resistência à tracção indirecta é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t' L} \quad (3.14)$$

Onde: σ_t – MPa; P – N; D – mm; t' – mm.

Os resultados obtidos neste ensaio, bem como os valores do teor em água dos provetes aquando o ensaio, encontram-se no Apêndice D.3. Os valores obtidos são arredondados não às décimas, como indicado pela norma ASTM D3967-08 (2008), mas sim às centésimas de forma a estarem concordantes com os restantes ensaios mecânicos.

Suplementarmente, para cada um dos testes é observado e indicado o modo como ocorre a rotura. Esta questão é estudada por Tavallali & Vervoort (2013) para arenitos, reconhecendo que para rochas anisótropas existem três tipos de rotura sob as condições do ensaio de RTB. Também Basu *et al.* (2013), para diversas litologias, adicionam alguma terminologia neste âmbito. Os tipos de rotura mais relevantes para o caso de estudo e que servem de base esquemática à sua identificação resumem-se na Figura 3.37.

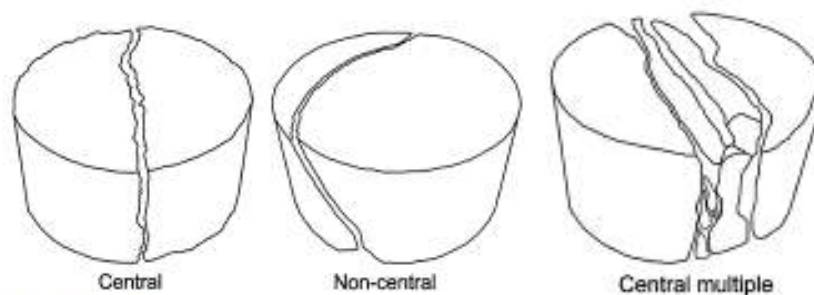


Figura 3.37 Esquema dos tipos de rotura possíveis para rochas não anisótropas no ensaio de tracção brasileiro (Basu *et al.*, 2013)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA INTACTA

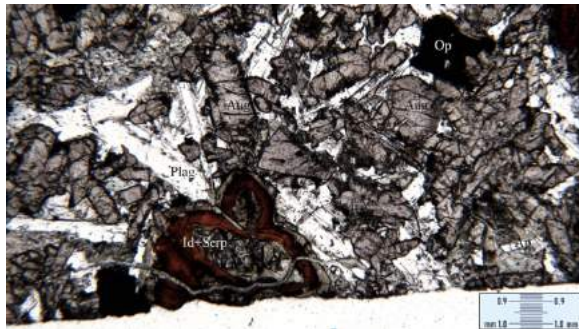
Esta secção apresenta, em primeiro lugar, a descrição petrográfica das amostras em estudo, seguindo-se os resultados obtidos nos ensaios destrutivos e não destrutivos. A finalidade é fazer uma análise sumária desses valores e verificar se estão concordantes com os publicados na literatura.

4.1.1 DESCRIÇÃO E ANÁLISE MICROPETROGRÁFICA

Para cada amostra e respectivos tipos geotécnicos seleciona-se uma amostra de mão representativa, descritas na secção 3.2.1, a partir da qual é produzida uma lâmina delgada nos laboratórios da FCUL. A descrição, macroscópica e microscópica, é adaptada da NP EN 12407 (2008), nomeadamente do modelo das rochas ígneas, tal como referido no capítulo 3.2. As fichas descritivas podem ser consultadas no Apêndice B, onde é apresentada uma descrição mais exaustiva acompanhada de várias imagens das lâminas delgadas.

Amostras BLV

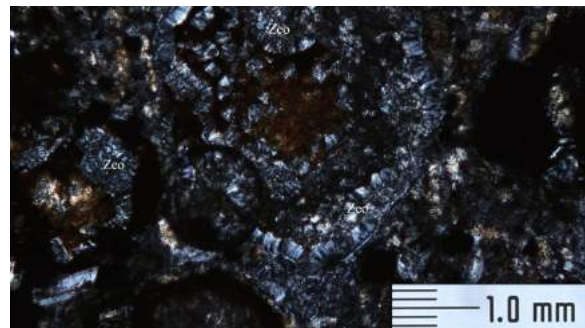
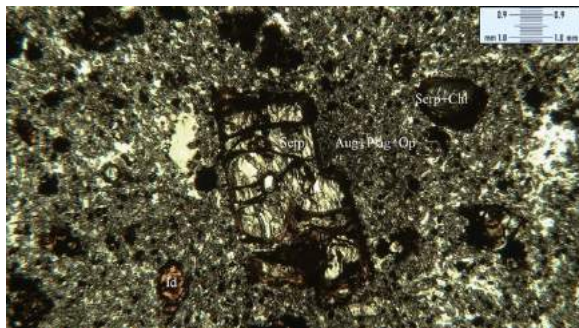
Para as sub-amostras BLV, em lâmina delgada, confirma-se que a textura é holocristalina e afanítica porfírica. Porém, em BLVI a matriz tem dimensão superior quando comparada com ambas as amostras de BLVII. Reconhecem-se algumas texturas especiais, como texturas ofíticas e sub-ofíticas em BLVI, marcando a cristalização numa mesma fase de Ti-augite e de plagioclase, bem como uma olivina com textura coronítica em BLVII.b, onde este mineral é envolto por cristais de plagioclase e zeólitos. Esta olivina apresenta alguma serpentina nos veios e também em seu redor. As rochas são, igualmente, semelhantes em termos de mineralogia. Como fenocristais observa-se a presença de olivina, contudo, na sua maioria, fortemente alterada para idingsite e também para serpentina e clorite. O primeiro mineral (epimagmático) surge em ambiente oxidante, de baixa pressão e temperatura intermédia, associado à intervenção de água, enquanto os restantes sugerem a ocorrência de alteração hidrotermal. A olivina adquire menores dimensões nas lâminas de BLVII. Na matriz reconhece-se como minerais dominantes a augite titanífera (dada a sua cor mais rosada) e a plagioclase. Associam-se a estas a rara apatite (BLVI) e minerais opacos, como magnetite e prováveis espinelas associadas e inclusas na olivina. Em termos de minerais secundários, para além dos produtos de alteração da olivina, também se identificam zeólitos e carbonatos, frequentemente a preencher microcavidades e fissuras presentes na lâmina. Também ocorrem em microfissuras inter, intra e transgranulares da plagioclase. Os zeólitos podem corresponder a uma fácies de metamorfismo de baixo grau que ocorre tardiamente. Algumas imagens representativas das lâminas encontram-se nas Figuras 4.1 (BLVI), 4.2 (BLVII.a) e 4.3 (BLVII.b). As restantes, tal como referido, podem ser consultadas no Apêndice B.



Esquerda: textura e mineralogia de BLVI, observando-se uma textura sub-oftica. Observam-se augites, plagioclases e minerais opacos. Como fenocristal ocorre uma olivina com bordo alterado para idingsite e o interior para serpentina (e clorite), apresentando ainda uma fractura que atravessa o mineral (objectiva x5, nicóis //)

Direita: plagioclase com maclas polissintéticas segundo a lei da albite. Em torno e no seu interior, ocorrência de cristais fibrosos de zeólito (objectiva x20; nicóis X)

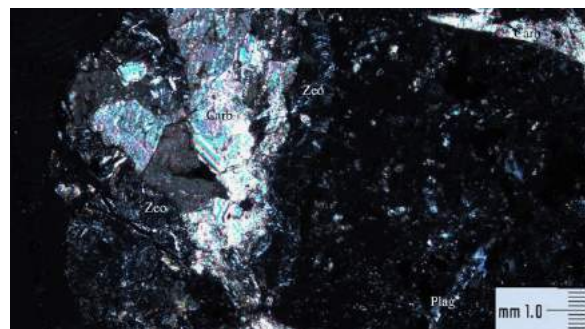
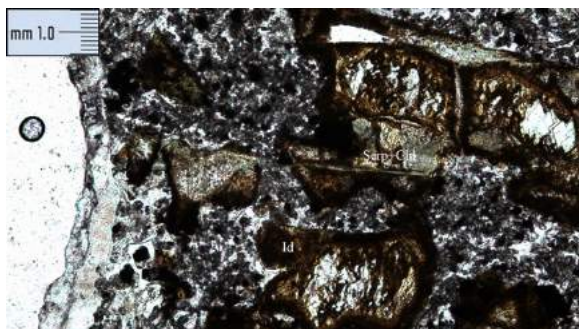
Figura 4.1 Secções tipo da lâmina delgada de BLVI



Esquerda: textura e mineralogia da amostra BLVII.a, evidenciando-se a natureza mais fina da matriz constituída por plagioclase, clinopiroxena e opacos. No centro, fenocristal de olivina alterado para idingsite nos bordos e para serpentina no interior (objectiva x5, nicóis //)

Direita: presença de zeólito em torno de olivina, transformada em idingsite, e em cavidades, apresentando um hábito de fibroso a prismático e disposto radialmente (objectiva x20, nicóis X)

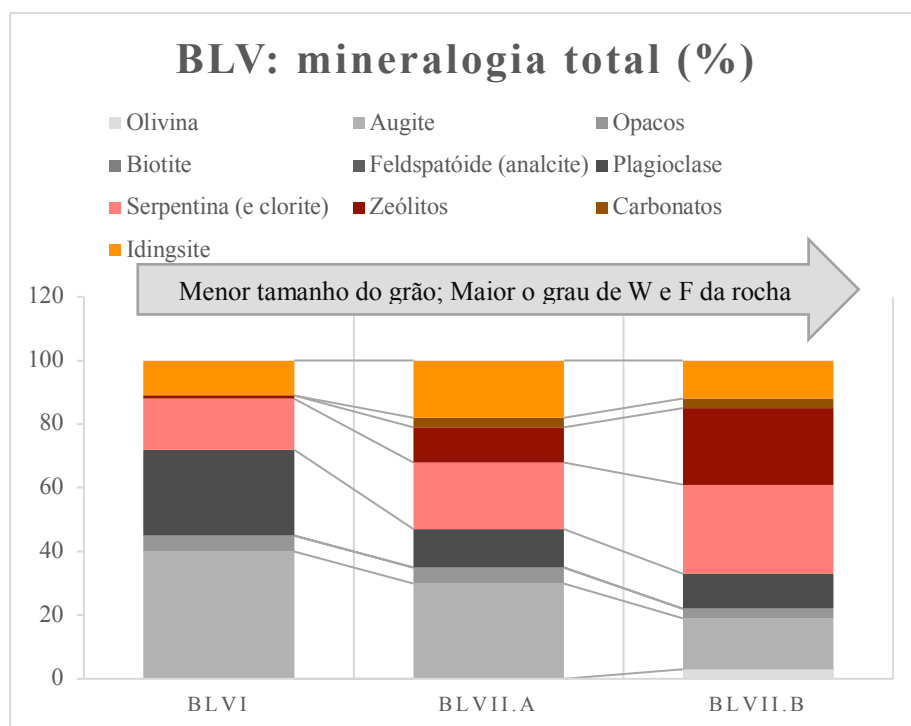
Figura 4.2 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BLVII.a



Esquerda: fenocristais de olivina fortemente alterados para serpentina e clorite no interior e idingsite nos bordos, sendo a matriz mais fina do que BLVI e composta por augite, plagioclase e opacos; à esquerda existência de um veio carbonatado e com zeólitos (objectiva x10; nicóis //).

Direita: veio com carbonatos e zeólito, sendo que este se dispõe para o lado direito da lâmina segundo um hábito esferoidal e associado à plagioclase (objectiva x10, nicóis X)

Figura 4.3 Secções tipo em lâmina delgada de BLVII.b



	BLVI	BLVII.a	BLVII.b
Serpentina (+Clorite) (%)	16	21	28
Idingsite (%)	11	18	12
Zeólito + Carbonatos (%)	1	14	27

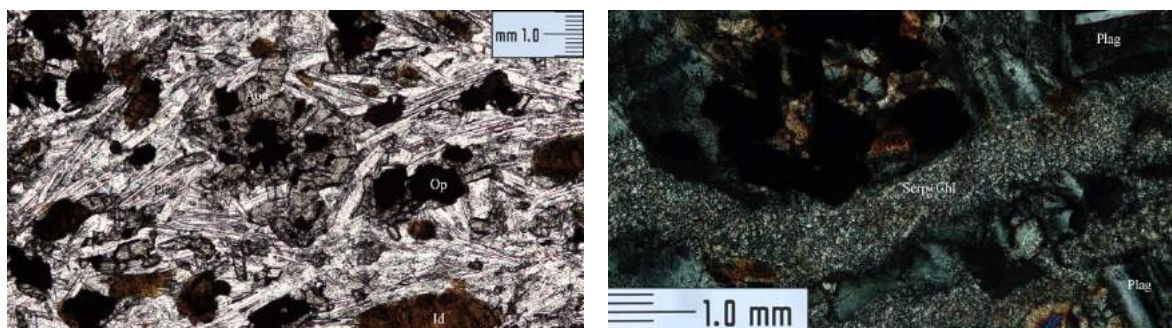
Figura 4.4 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BLV

Através de uma análise semi-quantitativa de volume, realizada com base nos diagramas apresentando na Figura 2.2, são atribuídas percentagens aos minerais com incerteza de $\pm 5\%$. A partir da mineralogia primária (antes da alteração) é feita a classificação QAPF, determinando a rocha como basalto com tendência alcalina. A Figura 4.4 sumariza as percentagens dos minerais observados, verificando-se que com o incremento de W de BLVI para BLVII, aumenta a quantidade de serpentina e os zeólitos. O mesmo não se pode dizer para a percentagem de idingsite.

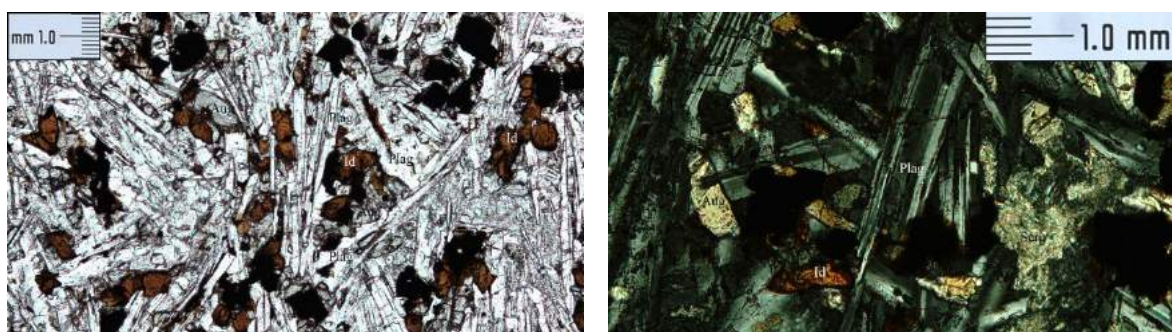
Amostras BLA

Nas lâminas delgadas da amostra BLA confirma-se que, em termos de textura, as rochas são holocristalinas e afaníticas equigranulares, não tendo geração fenocristalina. Dado o facto de as plagioclases se apresentarem com uma orientação semelhante e com menos de 1 mm de dimensão, denomina-se a textura por microlítica fluidal. Os cristais são euédricos a anédricos. Reconhecem-se texturas especiais na lâmina de BLAI, nomeadamente texturas ofíticas e sub-ofíticas nos arranjos cristalinos da plagioclase e da augite, bem como texturas variolíticas, devido à disposição divergente das plagioclases. Em termos de mineralogia primária ocorrem olivinas, quase totalmente alteradas para idingsite (maioritariamente) e para o conjunto serpentina e clorite. Na matriz ocorrem essencialmente plagioclases e augites, bem como minerais opacos (magnetite e provável espinela). A apatite é rara e restrita a BLAI. A mineralogia secundária é marcada pela existência de idingsite a alterar a olivina, bem como serpentina e clorite. Na matriz, a preencher os espaços ou as microfissuras da plagioclase ocorrem serpentina, zeólitos e carbonatos, sendo que os dois últimos têm maior volume em BLAII. Em ambas as amostras, a porosidade é reduzida e as microcavidades encontram-se preenchidas maioritariamente por zeólitos. As microfissuras podem ter ou não preenchimento, sendo que no caso afirmativo este consiste em zeólitos ou serpentina, associando-se a fracturas que afectam essencialmente a plagioclase,

mas também as augites. A existência de serpentina e clorite, bem como de zeólitos como mineral tardio, ilustram uma alteração hidrotermal das rochas. O grau de fissuração também se pode relacionar com a percentagem de zeólitos, essencialmente. A quantidade de plagioclase destas lâminas aponta para o facto de estas constituírem um termo mais evoluído (Palácios, 1985). As seguintes imagens são das lâminas BLAI (Figura 4.5) e BLAII (Figura 4.6). As restantes, podem ser consultadas no Apêndice B.



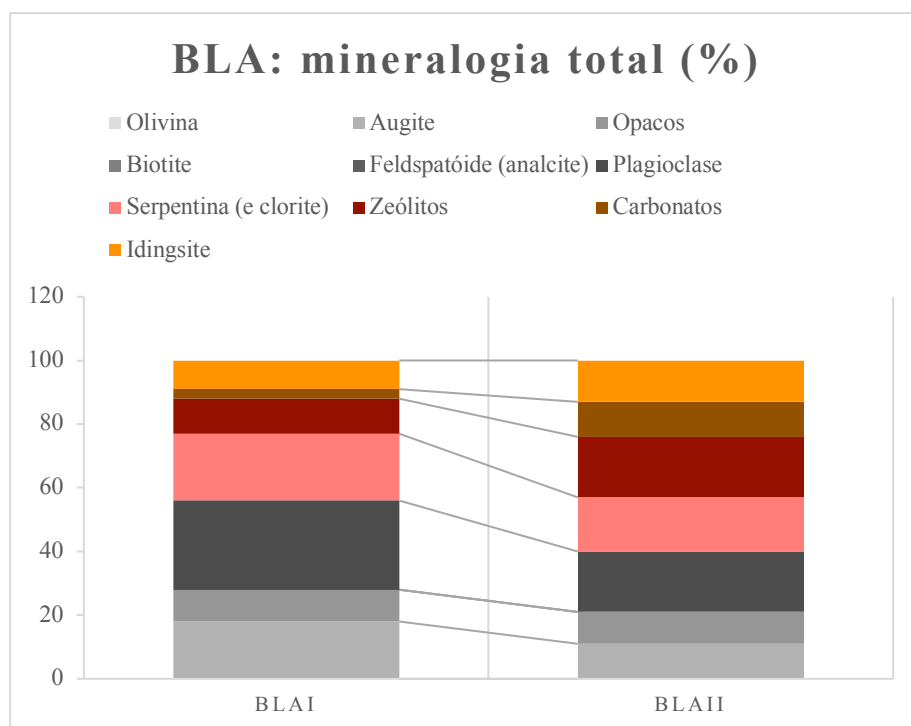
Esquerda: textura e mineralogia de BLAI, observando-se uma textura sub-óptica. Ocorrem na secção augites, plagioclases e minerais opacos. A olivina encontra-se alterada para idingsite (objectiva x10, nicóis //); Direita: veio preenchido por serpentina e clorite a atravessar plagioclases e augites (objectiva x20; nicóis X)
Figura 4.5 Secções tipo da lâmina delgada de BLAI



Esquerda: textura e mineralogia da amostra BLAII, constituída essencialmente por plagioclase, augites e olivinas alteradas para idingsite de pequena dimensão, bem como opacos (objectiva x10, nicóis //); Direita: plagioclase exibindo a macla segundo a lei da albite, associada à ocorrência de serpentinização (objectiva x20, nicóis X)

Figura 4.6 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BLAII

Através de uma análise semi-quantitativa de volume, foram atribuídas percentagens aos minerais com uma incerteza de $\pm 5\%$. Segundo a mineralogia primária, pela classificação da IUGS, conclui-se que se tem um basalto com tendência alcalina. A natureza hidrotermal e o grau da alteração é semelhante nas duas rochas, tendo mineralogia e textura idênticas. Contudo, há um ligeiro incremento de fracturação de BLAI para BLAII, marcada pelo aumento da proporção de zeólitos. Isto é concordante com a descrição macroscópica. A Figura 4.7 resume alguns dos aspectos referidos.

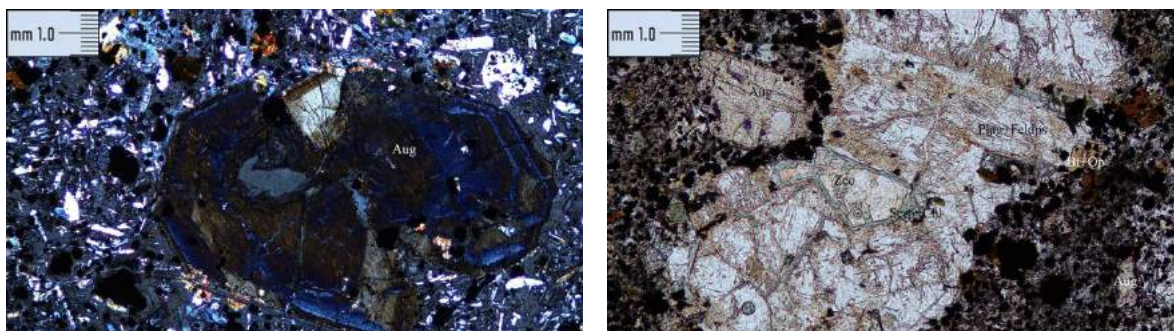


	BLAI	BLAII
Serpentina (+Clorite) (%)	21	17
Idingsite (%)	9	13
Zeólito + Carbonatos (%)	14	30

Figura 4.7 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BLA

Amostra BQ

Na lâmina delgada de BQ comprova-se a textura holocristalina e afanítica porfirítica, sendo que a matriz tem um grão bastante fino (micro a criptocristalina), pelo que a identificação clara dos minerais nem sempre é possível. Os fenocristais vão de euédricos a sub-euédricos e a matriz tem cristais sub-euédricos a anédricos. Como minerais primários, os fêlsicos são essencialmente plagioclase, existindo também, em pequena percentagem, um feldpsatóide que se pensa ser analcite. Este pode, contudo, associar-se a fases tardias de cristalização. O conjunto mineralógico ocorre, igualmente, na matriz em núcleos. Nestes, a plagioclase tem dimensão superior e um hábito pouco tabular dada a alteração e fracturação da mesma. Dos minerais máficos, destaca-se a augite que aqui ocorre como fenocristais, apresentando-se essencialmente segundo secções basais, frequentemente zonadas (Figura 4.8) e com núcleos alterados para serpentina e clorite. Pode ainda apresentar inclusões da matriz que lhe conferem uma textura esquelética. Os microfenocristais de olivina ocorrem, na sua maioria, alterados, principalmente para serpentina e clorite. Na matriz, para além da plagioclase, do feldpsatóide e de alguma augite de menores dimensões, ainda se identifica biotite e minerais opacos, provavelmente óxidos de ferro (magnetite). Como minerais secundários, identifica-se idingsite a alterar a olivina, contudo a associação serpentina e clorite é predominante como produto de alteração da mesma. Este conjunto mineralógico também ocorre em fissuras, intersectando os núcleos de plagioclase. Como alteração da plagioclase e do feldpsatóide, e também a ocupar os espaços vazios, reconhecem-se zeólitos. Os carbonatos, associados a estes, são pouco comuns. A porosidade é reduzida e as microcavidades raras, contudo existem diversas microfissuras principalmente a afectar os grãos de augite e plagioclase, tendo uma natureza inter, intra e transgranular. Na sua maioria, tal como referido, estão preenchidas. Imagens adicionais das lâminas podem ser consultadas no Apêndice B.

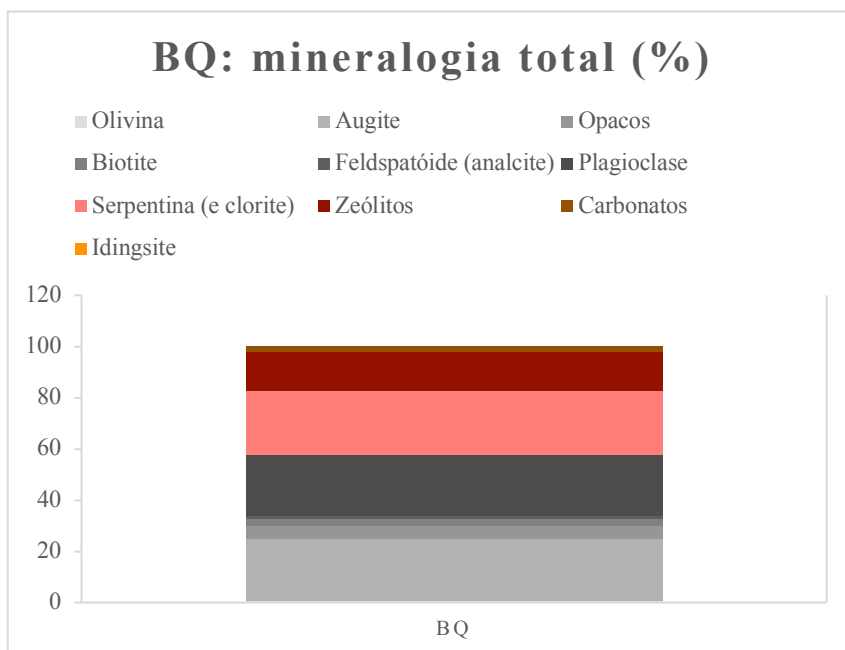


Esquerda: fenocristal de plagioclase, secção basal zonada e envolta por uma matriz com plagioclase, augite e opacos (objectiva x10, nicóis X);

Direita : núcleo de plagioclase de maior tamanho associado a feldspatóide, com veios de serpentina e clorite e nos interstícios zeólitos. Na matriz, biotite e opacos, juntamente com plagioclase e augite (objectiva x10, nicóis //)

Figura 4.8 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BQ

Através de uma análise semi-quantitativa de volume, foram atribuídas percentagens aos minerais com uma incerteza de $\pm 5\%$, estando expressas na Figura 4.9. A partir da mineralogia primária é feita a classificação QAPF que identifica a rocha como um basalto. A amostra de mão é classificada como W_1 dada a sua baixa alteração. Contudo, a percentagem de serpentinização e zeolitização é superior quando comparado com BLVI, W_{1-2} . Isto advém do menor tamanho do grão em BQ (com matriz micro a criptocristalina), o que dificulta a atribuição das percentagens aos minerais secundários da matriz, estando afectadas por um erro considerável e que pode resultar na sua inflação.

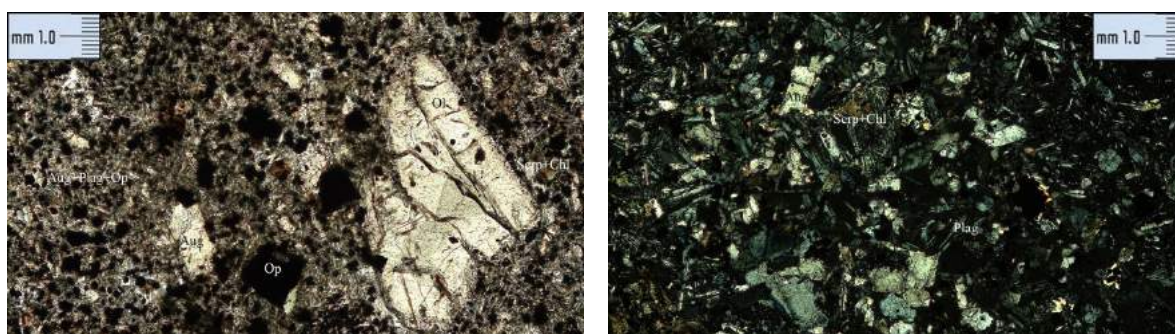


	BQ
Serpentina (+Clorite) (%)	25
Idingsite (%)	-
Zeólito + Carbonatos (%)	17

Figura 4.9 Avaliação semi-quantitativa dos minerais da amostra BQ

Amostra BM

Na lâmina delgada da amostra BM é possível confirmar que a textura é holocristalina e afanítica porfirítica, sendo que a matriz apresenta uma granularidade fina à semelhança de BQ. Os fenocristais têm forma sub-euédrica a anédrica e os cristais da matriz são na sua maioria anédricos. Quanto à mineralogia primária, na matriz e de natureza félsica ocorre plagioclase e feldspatóide que se pensa ser analcrite. Este pode, no entanto, ser um mineral resultante de fases tardias. Dos minerais máficos, a augite ocorre como fenocristais, sendo frequentemente o zonamento nas suas secções basais. A olivina ocorre como geração microfenocristalina. Na matriz, associada à augite de menores dimensões e à plagioclase, identifica-se rara biotite e minerais opacos com Fe (magnetite). Os minerais secundários surgem como produtos de alteração da olivina, sendo que esta se apresenta alterada para idingsite e, em maior proporção, para serpentina (associada a clorite). É frequente esta associação mineralógica ocorrer a alterar o núcleo de augites. A matriz félsica associa-se a zeólitos e a alguns carbonatos, sendo que na sua maioria preenchem microcavidades e veios que ocorrem na lâmina com pouca frequência. Tendem a estar associados ao feldspatóide e à plagioclase, na qual ocupam as fracturas. A Figura 4.10 apresenta alguns exemplos observados na lâmina, sendo que mais imagens podem ser consultadas no Apêndice B, bem como a ficha descritiva para esta amostra.

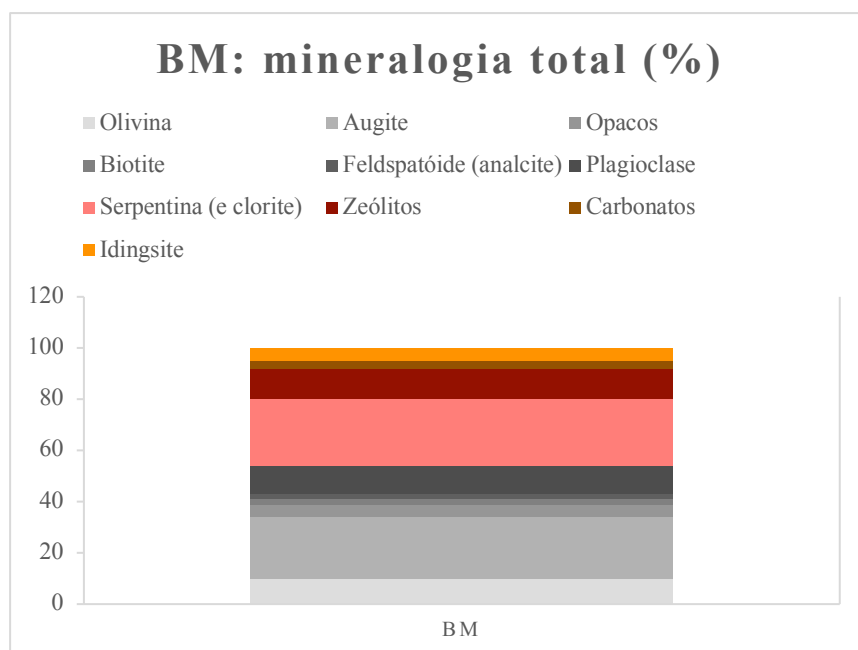


Esquerda: olivina anédrica, com núcleo alterado para serpentina e clorite, matriz com cristais de augite, plagioclase e opacos (objectiva x10, nicóis //);

Direita: matriz com cristais de augite, plagioclase, opacos e alteração para serpentina e clorite junto ao cristal de augite (objectiva x10, nicóis cruzados)

Figura 4.10 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BM

A análise semi-quantitativa de volume permite a atribuição de percentagens aos minerais com uma incerteza de $\pm 5\%$ - Figura 4.11. A partir da mineralogia primária é feita a classificação QAPF que identifica a rocha como um basalto de tendência alcalina. Tal como para a amostra BQ, a amostra de mão de BM é tipicamente W_1 apesar da alteração secundária visível em lâmina. A matriz micro a criptocristalina dificulta a atribuição das percentagens aos minerais secundários da matriz, podendo estar sobre-estimadas.

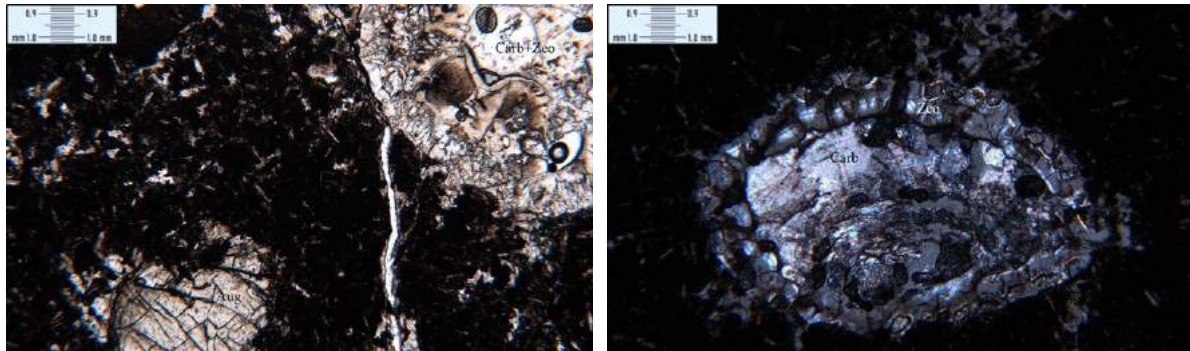


	BM
Serpentina (+Clorite) (%)	26
Idingsite (%)	5
Zeólito + Carbonatos (%)	15

Figura 4.11 Avaliação semi-quantitativa dos minerais da amostra BM

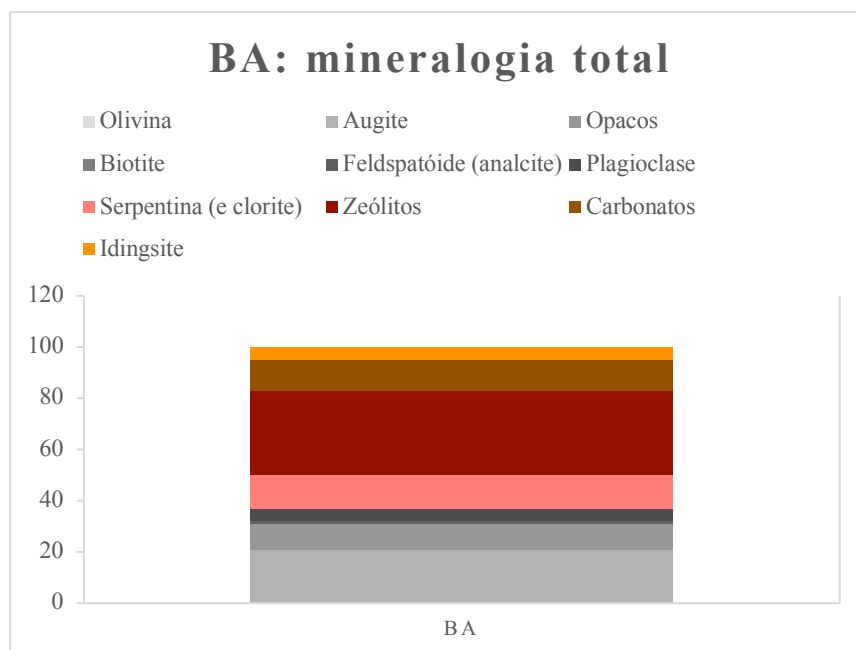
Amostra BA

A observação da amostra ao microscópio permite uma identificação clara da textura hialocristalina e afanítica porfirítica, sendo que a matriz vai de criptocristalina a vítrea. Os fenocristais são sub-euédricos e a matriz vai de anédrica a vítrea. Como textura especial, tem-se a textura em cavidade amigdaloidal que também é identificável macroscopicamente. Em termos de mineralogia primária, como minerais félsicos infere-se a existência de plagioclase e de feldspatóide, este a ocorrer nos interstícios. Os minerais máficos são a olivina, a augite e os minerais opacos (magnetite). Como minerais secundários tem-se a idingsite e a serpentina a alterar a olivina, sendo que a serpentina também pode ocorrer associada à augite. A matriz apresenta-se bastante fracturada e com amígdalas nas quais se observam zeólitos e carbonatos. Os veios tendem a ligar as várias amígdalas. Segundo a classificação QAPF corresponde a basanita. A Figura 3.27 inclui dois exemplos de secções vistas ao microscópio, sendo que imagens adicionais podem ser consultadas no Apêndice B.



Esquerda: amígdala com carbonatos e zeólito associada a uma fractura com preenchimento semelhante e cristal de augite à esquerda (objectiva x5, nicóis //);
Direita: amígdala com zeólitos e carbonatos no seu interior envolta por matriz criptocristalina (objectiva x5, nicóis X)

Figura 4.12 Secções tipo em lâmina delgada da amostra BA



	BA
Serpentina (+Clorite) (%)	13
Idingsite (%)	5
Zeólito + Carbonatos (%)	45

Figura 4.13 Avaliação semi-quantitativa dos minerais das amostras BA

A Figura 4.13 inclui o resumo da mineralogia, para a qual a percentagem volumétrica tem uma incerteza de $\pm 5\%$. Dada a sua grande fracturação e textura amigdalóide, a rocha contém uma elevada percentagem de zeólitos, sendo superior à das restantes amostras. A avaliação da alteração na matriz é difícil dada a sua natureza criptocristalina a vítrea, o que faz com que parte das percentagens sejam inferidas e estejam afectadas por algum erro.

4.1.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Massa volúmica, peso volúmico e porosidade

Os resultados dos ensaios para determinação da massa volúmica, peso volúmico e porosidade aberta, num total de 80 medições, incluem o Apêndice C.1 e a Tabela 4.1 resume os principais valores da análise estatística univariada para os provetes ensaiados.

Tabela 4.1 Resumo dos resultados de massa volúmica, peso volúmico e porosidade aberta para todas as amostras de basalto

Amostra		BLVI	BLVII	BLAI	BLAII	BQ	BM	BA
Nº. medições		12	12	12	10	10	10	14
Massa volúmica (ρ) (Mg/m ³)	máximo	2,89	2,83	2,78	2,67	2,97	2,94	2,54
	mínimo	2,61	2,36	2,54	2,58	2,87	2,85	2,03
	média	2,80	2,65	2,66	2,63	2,92	2,91	2,28
	desvio-padrão	0,08	0,15	0,06	0,03	0,03	0,03	0,17
	coeficiente de variação	0,03	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	0,07
Peso volúmico (γ) (kN/m ³)	máximo	28,37	27,75	27,27	26,16	29,08	28,80	24,88
	mínimo	25,61	23,13	24,92	25,29	28,15	27,97	19,94
	média	27,43	25,96	26,12	25,77	28,68	28,50	22,38
	desvio-padrão	0,79	1,52	0,62	0,31	0,31	0,28	1,70
	coeficiente de variação	0,03	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	0,08
Porosidade aberta (n_e) (%)	máximo	9,77	19,41	11,53	10,01	3,62	4,88	27,57
	mínimo	2,20	3,91	2,58	6,52	0,55	0,90	12,78
	média	4,26	10,13	6,41	8,07	1,48	2,14	18,93
	desvio-padrão	1,91	4,86	2,61	1,45	0,94	1,18	4,68
	coeficiente de variação	0,45	0,48	0,41	0,18	0,64	0,55	0,25

Como seria de esperar da análise dos resultados, verifica-se que quanto mais intenso o estado de alteração da amostra, maior é a porosidade aberta (n_e) e menores são a massa (ρ) e o peso (γ) volúmcicos. As amostras classificadas como W₁ exibem os valores mais elevados de ρ e γ , bem como menor n_e . BM mostra-se ligeiramente mais alterado, explicando assim a diferença de valores obtidos. Além disso, nestas rochas, há uma variabilidade significativa de n_e , demonstrada pelo coeficiente de variação superior a 0,5. Para as restantes amostras, observa-se que quanto maior a alteração, maior a porosidade. O peso volúmico não tem variações significativas para as amostras W₁₋₂ a W_{2,3}, pois a maioria das fracturas estão fechadas. As amostras BLAI e BLAII são semelhantes quanto às suas propriedades físicas, estando BLAII ligeiramente mais alterada. BLVII inclui basaltos, W₂ e W₃, com grau de fracturação semelhante, não exibindo discrepâncias nas suas propriedades físicas. Com efeito, têm massa volúmica e peso volúmico ligeiramente inferiores a BLA e uma porosidade aberta superior, explicada pelo grau de alteração superior. Os basaltos amigdalóides e anastomosados (BA) são os que mais divergem das restantes amostras quanto às características físicas, tendo uma massa e um peso volúmcicos consideravelmente menores e uma porosidade aberta superior. Isto deve-se às suas propriedades texturais e estruturais, bem como à alteração dos núcleos basálticos.

Quanto aos valores descritos na literatura, de um modo geral os obtidos para o CVL estão concordantes. Note-se, contudo, que apesar dos valores serem consistentes, nem sempre um mesmo grau de alteração produz valores de γ e n_e semelhantes, e vice-versa. Amostras com uma massa volúmica próxima podem ter diferentes porosidades (tanto maiores como menores). Num contexto geográfico mais próximo, os valores de peso volúmico caem no intervalo estabelecido por González de Vallejo *et al.* (2007) para as amostras das Ilhas Canárias. Os basaltos da Madeira, com γ semelhantes aos do CVL,

nem sempre correspondem em termos de grau de alteração. Conclui-se que os diversos basaltos apresentam uma assinatura própria no que toca às características físicas.

Dureza ao ressalto

Para este ensaio foram realizadas um total de 421 medições, nomeadamente 52 no campo, na frente de escavação da Pedreira da Moita da Ladra, e as restantes em blocos rochosos recolhidos em Queijas, no parque florestal de Monsanto e em Alcântara. Note-se que para as amostras BQ (5 blocos) e BM (6 blocos), fizeram-se 20 medições em bloco, tal como recomendado por Aydin (2009). Na amostra BA foi necessário excluir algumas das 20 leituras dada a fracturação do material aquando o impacto do pistão, invalidando a medição. Toda a descrição do ensaio e de cada bloco encontra-se no Apêndice C.3. Além disso, a apresentação das estatísticas síntese, tal como referido na secção 3.2.2, é sujeita a um tratamento de dados para evitar a existência de valores anómalos que se reconhece não serem representativos da heterogeneidade e anisotropia rochosa, mas sim de asperezas ou irregularidades que afectam o modo de impacto do pistão do martelo de Schmidt, bem como de limitações devidas à forma e geometria dos blocos.

Na Tabela 4.2 resumem-se as amostras que exibem valores anómalos e às quais foram aplicados os vários métodos de exclusão de *outliers*. Conclui-se que o critério de Peirce é o mais sensível para a sua identificação sendo, por vezes, o único método a reconhecer *outliers*. É, como tal, preferível ao critério de Chauvenet. Faz-se apenas referência que este detecta mais um *outlier* do que o Peirce em BV_E2, numa segunda aplicação do método (para n=19) o que é desaconselhável, assumindo-se como tal os dados obtidos após a utilização do critério de Peirce. O método dos quartis pode ser visto como um método complementar daquele pois, apesar de não ser tão sensível a *outliers*, tem uma diferente base de cálculo, usando os quartis.

Em suma, os dados iniciais e os dados sem *outliers* não diferem numa ordem de grandeza significativa, principalmente no que toca às medidas de localização. O desvio-padrão é o que mostra maiores variações, diminuindo com a rejeição de valores, tal como se esperava. Com isto, apesar do tratamento de dados ser subjectivo e dependente do autor, conclui-se que, para uma análise mais restritiva, deve ser aplicado o critério de Peirce.

Tabela 4.2 Amostras que apresentam *outliers* e os métodos usados para a sua determinação

Critério	BQ		BM		BV	BA		
	BQ1	BQ4	BM ponto 2		BV E2	BA2 FaceA	BA6 FaceA	BA6 FaceB
	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	mínimo	mínimo
Chauvenet		x			x		x	x
Peirce	x	x	x	x	x	x	x	x
Quartis		x		x			x	

Relativamente aos resultados da Tabela 4.3 e para os blocos BQ e BM, os valores limite obtidos dependem não só das características rochosas mas também são influenciados pelos constrangimentos de dimensão do bloco, o que impossibilita a execução de mais leituras. Nota-se que a amostra BQ apresenta maior dispersão entre os valores máximo e mínimo face a BM, que tem menor média de desvios-padrão. Apesar de apresentar blocos com valores de ressalto médios na ordem de 58, alguns blocos associam-se a ressaltos muito inferiores (30), o que conduz a um valor médio de ressalto para esta amostra de 41. BM apresenta menores desvios, sendo que os ressaltos médios variam entre 55 e 40, obtendo-se um valor médio para amostra de 48. As leituras executadas para BV diferem das

restantes visto que, para este caso, foram feitas no campo segundo diversas orientações conforme os planos de descontinuidades do maciço estudado. Para as várias estações, os valores médios de R variam entre 43 e 53, obtendo-se média de 48. Este valor é superior ao esperado, pois o grau de alteração, isto é, W_{1-2} , é superior ao das amostras BM e BQ, W_1 . A diferença reside na falta de constrangimentos de dimensão e na existência de várias superfícies que foram actuadas.

Os resultados, quer de blocos rochosos quer do afloramento estudado, são concordantes com os obtidos em basaltos estudados na Grécia - Tabela 2.7, na Nova Zelândia (W_1) - Tabela 2.8, e na Turquia por Dinçer *et al.* (2004) - Tabela 2.9. Os basaltos amigdalóides têm valores médios de R que variam entre 21 a 32, sendo a respectiva média igual a 28. Este valor é concordante com os de tufos da Turquia estudados por Dinçer *et al.* (*op. cit.*) e superior ao obtido na Nova Zelândia (Moon & Jayawardane, 2004) para basaltos W_2 com textura distinta da amigdalóide.

Tabela 4.3 Resultados obtidos no ensaio de dureza ao ressalto (Q1- primeiro quartil, Q3 – segundo quartil, IQR – *inter-quartil range*)

Amostra		Estatísticas de síntese									
		Máximo	mínimo	média	moda	mediana	Q1	Q3	IQR	desvio-padrão	coeficiente de variação
BQ	BQ1	64	53	58	55	57	55	61	6	3,4	0,06
	BQ2	59	43	52	55	53,5	47,25	56,5	9,25	5,0	0,10
	BQ3	48	21	33	30	32	26	39	13	7,9	0,24
	BQ4	38	23	30	35	31	27	35	8	4,3	0,14
	BQ5	44	19	31	28	29	26,5	37	10,5	6,9	0,22
R médio		58	30	41						5,5	
BM	1_BM1	58	34	46	48	47	42,5	48,75	6,25	5,8	0,12
	1_BM2	66	46	55	59	55	52	59	7	5,4	0,10
	1_BM3	51	28	40	42	40,5	36	45,5	9,5	5,7	0,14
	2_BM1	64	37	49	50	50	42	53,75	11,75	7,7	0,16
	2_BM2	59	40	48	42	46	42	53	11	5,7	0,12
	2_BM3	55	36	48	55	48,5	44	52,75	8,75	5,3	0,11
R médio		55	40	48						5,9	

Amostra			Estatísticas de síntese									
			Máximo	mínimo	média	moda	mediana	Q1	Q3	IQR	desvio-padrão	Esta
BV	BV_E1		60	32	47	48	48	40,5	51,75	11,25	7,4	0,16
	BV_E2 *		56	37	44	38	42	38	48	10	5,1	0,12
	BV_E3		64	45	53	49	51	48	57,75	9,75	5,9	0,11
R médio			44	53	48						6,13	
* só 12 leituras												
BA	BA2	A	36	17	27	33	27	22,75	32	9,25	5,7	0,21
		B	36	24	29	28	27	28	32	5	3,6	0,12
	BA3		31	18	25	26	26	20,75	29	8,25	4,3	0,17
	BA4		26	26	21	24	21	19	24	5	3,1	0,14
	BA5	A	34	21	28	32	28,5	25	31,25	6,25	3,6	0,13
		B	36	21	27	26	26	24	31	7	4,0	0,15
	BA6	A	38	23	32	32	32	30	34	4	3,9	0,12
		B	38	26	32	36	32	29	36	7	3,5	0,11
R médio			21	32	28						4,0	

Velocidade de propagação de ultrassons

Este ensaio contempla todos os provetes sujeitos ao ensaio de RCU e, adicionalmente, os basaltos amigdalóides (BA). Todos os resultados encontram-se no Apêndice C.2, tendo-se realizado um total de 35 medições. A Tabela 4.4 contém o resumo desses mesmos resultados.

Tabela 4.4 Resultados do ensaio para determinação das propriedades dinâmicas de amostras de basalto do CVL

Amostra		BLVI	BLVII	BLAI	BQ	BA
Nº. medições		6	6	11	6	6 a 4*
V _p (m/s)	Máximo	5502	5028	5532	6245	1653
	mínimo	4806	1366	4116	5460	858
	média	5126	3413	4735	5945	1196
	desvio-padrão	227	1451	407	270	270
	coeficiente de variação	0,04	0,43	0,09	0,05	0,23
V _s (m/s)	Máximo	3087	2787	3474	3663	700
	mínimo	2362	807	2322	3009	449
	média	2670	1787	2748	3421	550
	desvio-padrão	287	864	354	220	87
	coeficiente de variação	0,11	0,48	0,13	0,06	0,16
v _s = 0,53v _p (correlação obtida considerando 5 amostras)						
E _d (GPa)	Máximo	67,19	55,05	74,95	96,67	N/D
	mínimo	39,62	4,04	35,86	67,42	
	média	52,81	28,22	50,50	85,54	
	desvio-padrão	10,68	22,21	12,09	9,80	
	coeficiente de variação	0,20	0,79	0,24	0,11	
v _d	Máximo	0,33	0,36	0,25	0,23	
	mínimo	0,02	0,07	0,00	0,18	
	média	0,15	0,23	0,14	0,20	
	desvio-padrão	0,12	0,10	0,08	0,02	
	coeficiente de variação	0,78	0,44	0,60	0,11	
*para as ondas de corte contabilizam-se 6 provetes, 5 para as ondas longitudinais, enquanto para E e v apenas 4						

As velocidades longitudinais e transversais obtidas estão de acordo com o grau de alteração e fracturação das amostras. Basaltos de melhor qualidade e menor fracturação apresentam maiores valores de V_p e V_s , enquanto que os de pior qualidade têm menores valores dessas variáveis. O mesmo se pode dizer relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico, comprovando que provetes do CVL de melhor qualidade e maior rigidez, apresentam valores de E_d mais elevados. Salienta-se a situação de BLVII, onde há um coeficiente de variação superior a 0,5, provando que há uma elevada discrepância nos valores. Isto deve-se aos planos de descontinuidade que afectam os provetes e, consequentemente, as velocidades e, principalmente, a magnitude da elasticidade dinâmica. O coeficiente de Poisson apresenta algumas inconsistências nos resultados, esperando-se menores valores de BQ, face aos obtidos, e maiores para BLVI e BLAI. Isto pode ter a ver com a relação entre V_s e V_p , com possíveis erros na execução do ensaio e com microfissuras não visíveis nos provetes. Estes valores devem ser tomados com reservas. No caso de BA, a rede de veios e fracturas, muitas vezes até abertas, condicionam os resultados de V_s e V_p gerando coeficientes de Poisson negativos ou quase nulos, que não foram considerados.

Observa-se consistência entre os valores descritos no estado de arte (secção 2.3.2) e os obtidos. A natureza particular dos basaltos do CVL (W, F, porosidade e textura) influencia as propriedades dinâmicas, o que se manifesta, por exemplo, em basaltos com o mesmo grau de alteração estudados (da

literatura e do CVL) que se associam a valores distintos de velocidades, nomeadamente V_p . Para as 5 amostras ensaiadas, a correlação entre V_s e V_p está conforme com a estabelecida na literatura para a mesma litologia.

4.1.3 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Resistência à compressão uniaxial

Os resultados do ensaio RCU apresentam-se no Apêndice D.1 e as estatísticas síntese encontram-se resumidos na Tabela 4.5. No total foram conduzidos à rotura 29 provetes, tendo uma delas sido considerada inválida. Relativamente a σ_c , verifica-se que quanto menor W e F, maior é a resistência à compressão, tal como previsto. A resistência depende não só do grau de fracturação, mas tal como exposto na Figura 3.27.a, também da orientação das descontinuidades. Na maioria dos provetes, as fracturas apresentam-se com orientação diagonal, o que favorece a menor resistência dos provetes. Esta não é propriamente representativa da matriz rochosa, mas sim dos planos de fraqueza que afectam os provetes. Isto conduz ao decréscimo dos valores médios de cada amostra, sendo uma importante característica dos basaltos do CVL. Também os valores de σ_c são muito variáveis na literatura, estando os aqui obtidos concordantes com a gama de resultados publicados.

Tabela 4.5 Resumo dos resultados do ensaio de RCU: valores de σ_c e do teor em água dos provetes na rotura

Amostra	N.º medições	σ_c (MPa)					w (%)				
		Máximo	mínimo	média	desvio-padrão	coeficiente de variação	Máximo	mínimo	média	desvio-padrão	coeficiente de variação
BLVI	6	80,70	34,51	58,36	16,90	0,29	1,62	0,94	1,24	0,27	0,22
BLVII	a	38,40	19,90	26,12	8,69	0,33	1,70	1,42	1,59	0,12	0,08
	b	52,46	12,99	33,38	16,14	0,48	4,23	2,72	3,59	0,64	0,18
	a+b	52,46	12,99	29,75	13,46	0,45	4,23	1,42	2,59	1,10	0,43
BLAI	10	92,52	19,60	48,81	21,41	0,44	2,32	0,59	1,81	0,54	0,30
BQ	6	203,10	65,04	137,91	49,90	0,36	0,57	0,29	0,39	0,10	0,27

A execução do ensaio numa prensa servo-controlada e o posterior tratamento de dados no Microsoft excel permitiu obter as curvas tensão-extensão representadas na Figura 4.1. Salienta-se que nem sempre é possível a obtenção de curvas de extensão lateral para todos os provetes ensaiados dada a ocorrência de falhas nas leituras com os LVDTs horizontais. A curva individual para cada provete pode ser consultada no Apêndice D.1. Estas rochas acomodam pouca deformação, sendo como tal materiais rígidos, e têm uma rotura que, em regra, ocorre em domínio elástico, sendo por isso frágeis. A tensão de pico é maior para as rochas BQ, diminuindo para BLAI e BLVI e atingindo níveis inferiores em BLVII acompanhando, como tal, valores de W e F crescentes. Na extensão axial, o trecho inicial da curva tende a ter uma ligeira concavidade que espelha a recompressão dos provetes (fecho das fissuras dada a ausência de confinamento) e a adaptação destes aos pratos da prensa. Só posteriormente se inicia o trecho elástico. A maioria dos provetes BQ exibem um comportamento frágil, contudo em poucos provetes desta amostra e na maioria dos provetes das restantes, ocorre um comportamento semi-frágil, distinguindo-se uma tensão de cedência (σ_y) antes da rotura final do material. Isto deve-se à existência de planos de heterogeneidade (macro e microscópicos). Na extensão axial este fenómeno é materializado por uma quebra de tensão que se representa segundo patamares, pois o provete restitui σ_c , e a curva da extensão lateral tende a tornar-se mais irregular. Muitas vezes, tomando-se como exemplos BQ8, BLAI4, BLVI3 e BLVIIa.3, dá-se o fenómeno de encurvamento visível na curva de ε_a .

Após atingir a tensão de cedência, σ continua a incrementar, porém para uma maior taxa de deformação, resultando num menor declive da curva até se atingir a tensão de rotura. Após σ_y , habitualmente os LVDTs horizontais são muito afectados e, como tal, as curvas ε_l são consideradas apenas até esse ponto (exemplo: BLVI5 e BQ5).

Através das curvas tensão-extensão é possível quantificar E e ν estáticos, estando as estatísticas síntese destas grandezas apresentadas na Tabela 4.6. As anomalias nos seus valores devem-se ao grau de alteração, mas principalmente à sua fissuração. Não se exclui também possíveis falhas de leitura, particularmente dos LVDTs horizontais, na execução dos ensaios.

São determinados os três tipos de módulos descritos na Figura 3.26, secção 3.2.3. Todos eles, como indicado pelos valores médios, atingem valor superior para a amostra W_1 (BQ) e menor para a amostra $W_{2,3}$ (BLVII), corroborando que a rigidez decresce com o aumento de W e F . Repare-se que $E_{secante}$ tem sempre valor inferior face aos outros módulos, pois considera a curva desde o ponto inicial até à rotura, incluindo mais do que o trecho elástico. Este vai incluir um menor declive da curva ε_a . Os valores de $E_{tangente}$ e E_{medio} tendem a ser mais próximos entre si, havendo pequenas excepções. Estas ocorrem, na sua maioria, quando as fissuras têm efeito nos resultados, gerando anomalias e fazendo com que E_{medio} seja superior a $E_{tangente}$ ou vice-versa. Como se pode observar nos valores médios, $E_{tangente}$ e E_{medio} têm maior diferença nos basaltos $W_{2,3}$ (BLVII). Considerando cada provete individualmente - Figura 4.14, por vezes face ao respectivo σ_c , conclui-se que $E_{tangente}$ é sobreestimado ou subestimado. Como tal, para o caso dos basaltos do CVL e para toda a sua gama de alteração, E_{medio} constitui, na maioria dos cenários, o módulo mais adequado, devendo ser este o principal a considerar dos três (quando é possível a sua obtenção). Conclui-se que a diferença dos módulos deriva da heterogeneidade intrínseca do material rocha. Na Figura 4.15 comparam-se os módulos estáticos com E_d e, tal como era de esperar, este apresenta sempre valor superior ao homólogo estático. A excepção verifica-se para os provetes BLVII b., onde a rede próxima de veios terá contribuído para uma anomalia dos valores de E_d e sua subestimação. Adicionalmente, $E_{tangente}$ e E_{medio} são mais próximos de E_d como seria de esperar para um basalto, rocha de resistência elevada, baixa porosidade e elevado peso volúmico.

Tabela 4.6 Resumo dos resultados dos módulos de Young e do coeficiente de Poisson estáticos

Amostra		BLVI	BLVII	BLAI	BQ
Nº. medições		6	6	11	6
$E_{tangente}$ (GPa)	Máximo	27,21	20,99	27,78	46,86
	mínimo	11,56	7,97	6,88	7,41
	média	19,36	11,33	14,96	33,22
	desvio-padrão	5,60	4,48	6,24	12,38
	coeficiente de variação	0,29	0,40	0,42	0,37
$E_{secante}$ (m/s)	Máximo	19,52	15,36	28,39	38,25
	mínimo	8,53	3,97	4,66	17,74
	média	13,48	8,21	12,41	25,76
	desvio-padrão	3,95	4,47	6,90	6,61
	coeficiente de variação	0,29	0,55	0,56	0,26
E_{medio} (GPa)	Máximo	24,22	18,69	30,93	48,32
	mínimo	12,91	4,37	7,08	19,01
	média	19,87	9,66	15,97	33,06
	desvio-padrão	3,97	4,81	7,02	9,64
	coeficiente de variação	0,20	0,50	0,44	0,29
ν	Máximo	0,28	0,31	0,33	0,24
	mínimo	0,22	0,26	0,17	0,20
	média	0,25	0,28	0,26	0,22
	desvio-padrão	0,004	0,02	0,06	0,01
	coeficiente de variação	0,15	0,08	0,22	0,07

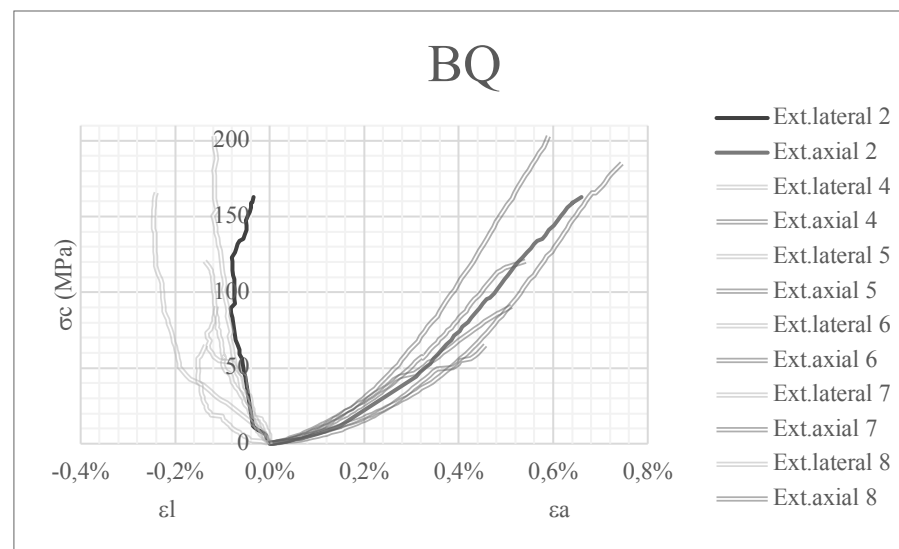
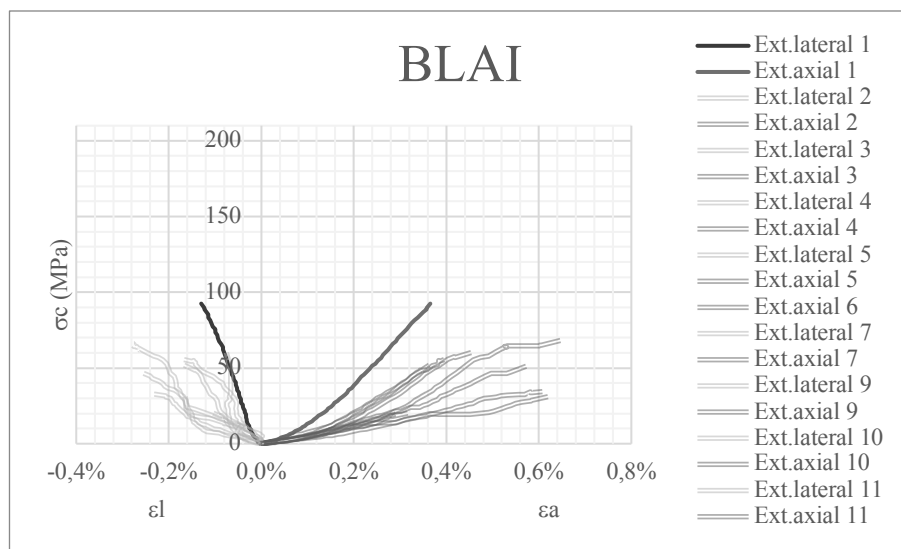
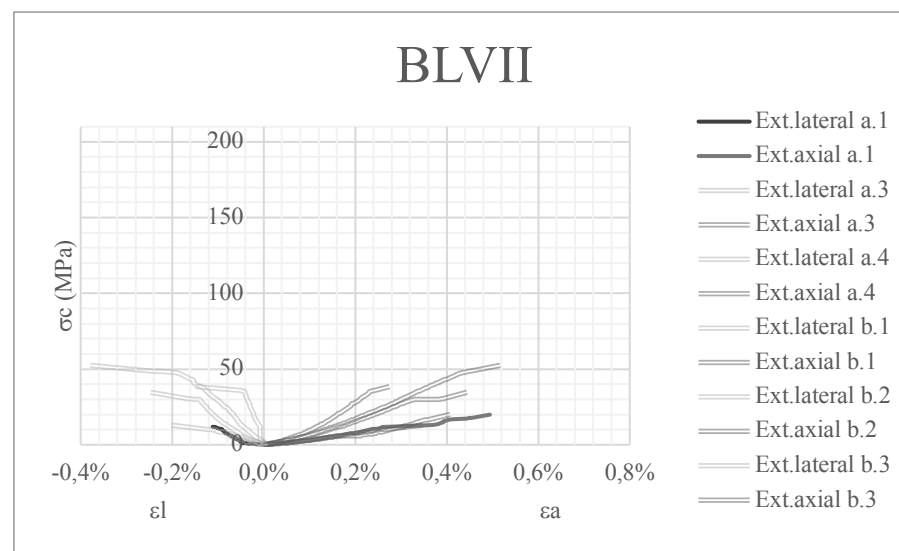
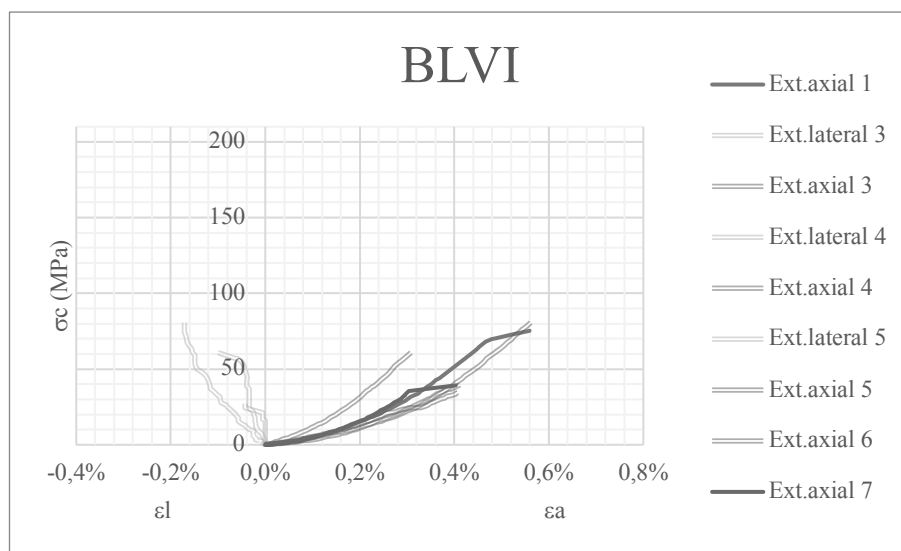


Figura 4.14 Curvas tensão-extensão obtidas no ensaio RCU

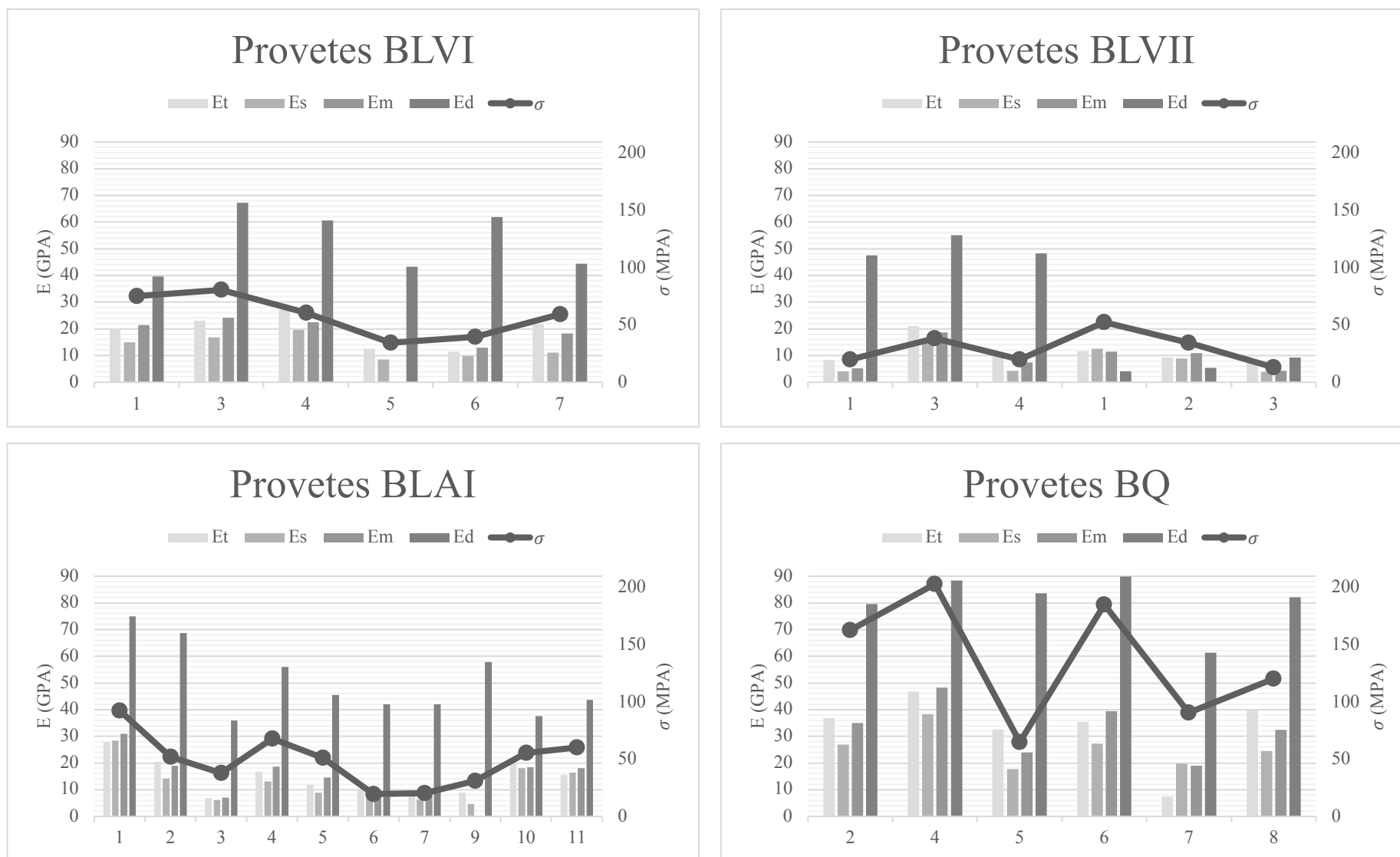


Figura 4.15 Comparação dos diversos módulos de elasticidade (estáticos e dinâmicos) entre si e com o valor da resistência à compressão uniaxial para cada provete ensaiado

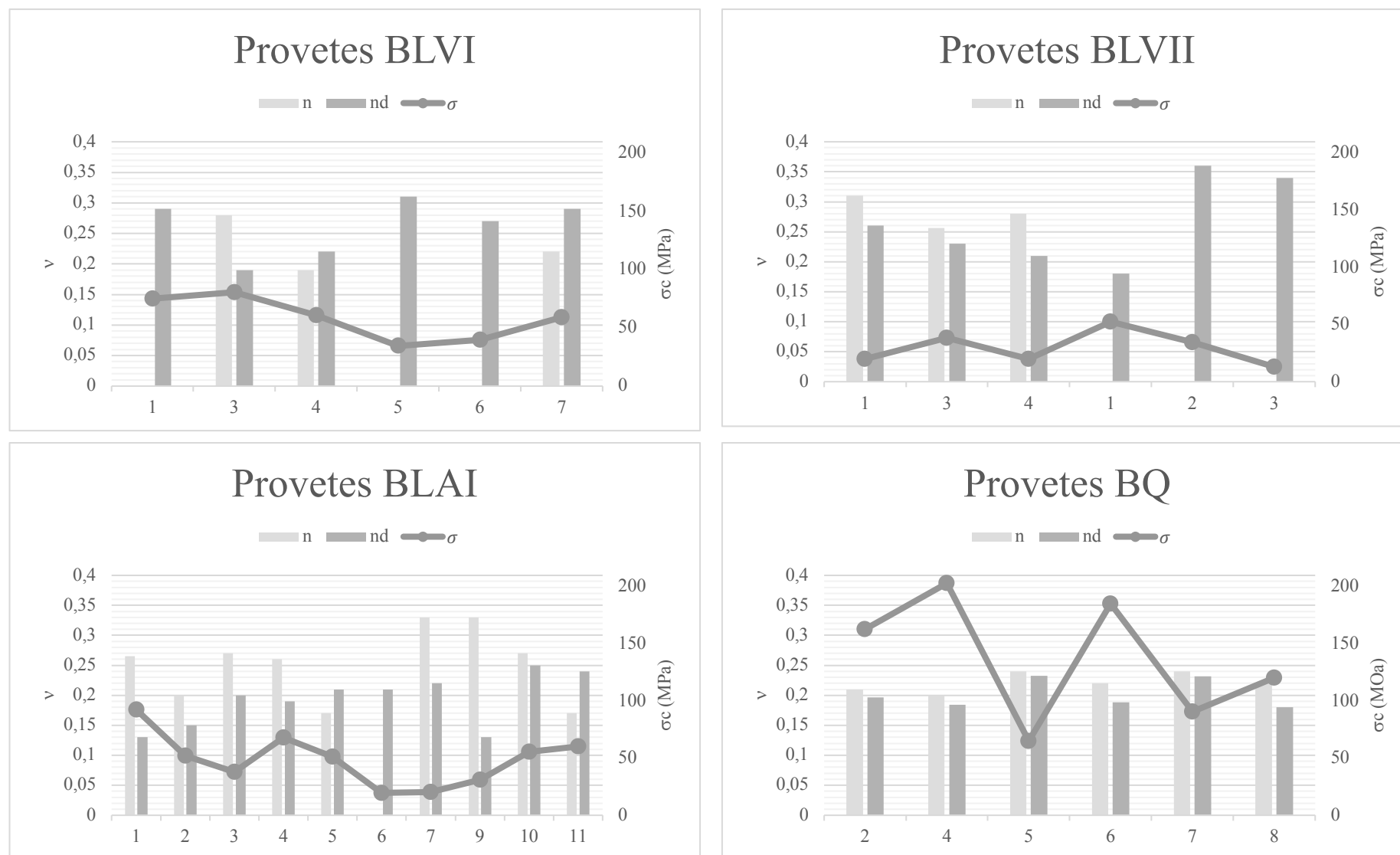


Figura 4.16 Comparação dos diversos coeficientes de Poisson (estático e dinâmico) entre si e com a resistência à compressão uniaxial de cada provete ensaiado

O comportamento semi-frágil de diversos provetes e possíveis falhas nos LVDTs horizontais levam à dificuldade na obtenção de um valor de ν dentro do esperado, isto é, inferior a 0,35, já que um valor superior é incomum para rochas basálticas (Yu *et al.*, 2015). Esta grandeza é determinada para cada módulo de Young porém, nem sempre é possível obter-se 3 coeficientes de Poisson. Com efeito, o ν estático é selecionado provete a provete. Em primeiro lugar, excluem-se as leituras desajustadas e, depois, faz-se uma comparação com o respectivo valor de σ_c para verificar se ocorre alguma sobre-estimação ou subestimação no seu valor. Por último, compara-se com o homólogo dinâmico que deverá ter valor inferior - Figura 4.16. Caso tal não se verifique (por exemplo: BLVI4, BLA5 e BLA11) é possível estar-se na presença de um ν estático subestimado. Esta situação é vista com cautela e para cada provete, pois em vez do valor estático pode ser o dinâmico que se apresenta anômalo. Essa avaliação é feita tendo como referência que ν_d é cerca de 25% inferior à respectiva grandeza estática. Quando mais do que um valor de ν (para um provete) passa nos critérios, então realiza-se a sua média e considera-se esse valor para o provete em apreço. Muitas vezes, foi apenas determinado um valor de ν para cada provete, e nem sempre foi possível obter a variável em questão para todas as espécies rochosas ensaiadas. O resumo dos resultados encontra-se na Tabela 4.6. Verifica-se que, quanto maior W e F, maior o correspondente ν , tal como esperado, sendo que atinge o máximo para BLVII ($W_{2,3}$) e o mínimo em BQ (W_1).

Os valores de E e ν das amostras do CVL estão dentro da gama de valores estabelecidas por vários autores para a mesma litologia. Observa-se, para o caso específico dos basaltos W_1 descritos para a Índia (Gupta & Seshagiri, 1998; 2000) e para a Madeira (Lourenço *et al.*, 2010) o valor de E é superior ao obtido para o estado de alteração homólogo do CVL. Isto mostra a influência das fissuras fechadas e dos veios preenchidos tão comuns nas amostras basálticas estudadas, diminuindo a sua resistência, rigidez e conferindo-lhe um comportamento semi-frágil. Além disso, as amostras projectam-se no diagrama de Deere & Miller (1966) dentro do campo dos basaltos, como se verifica na Figura 4.17.

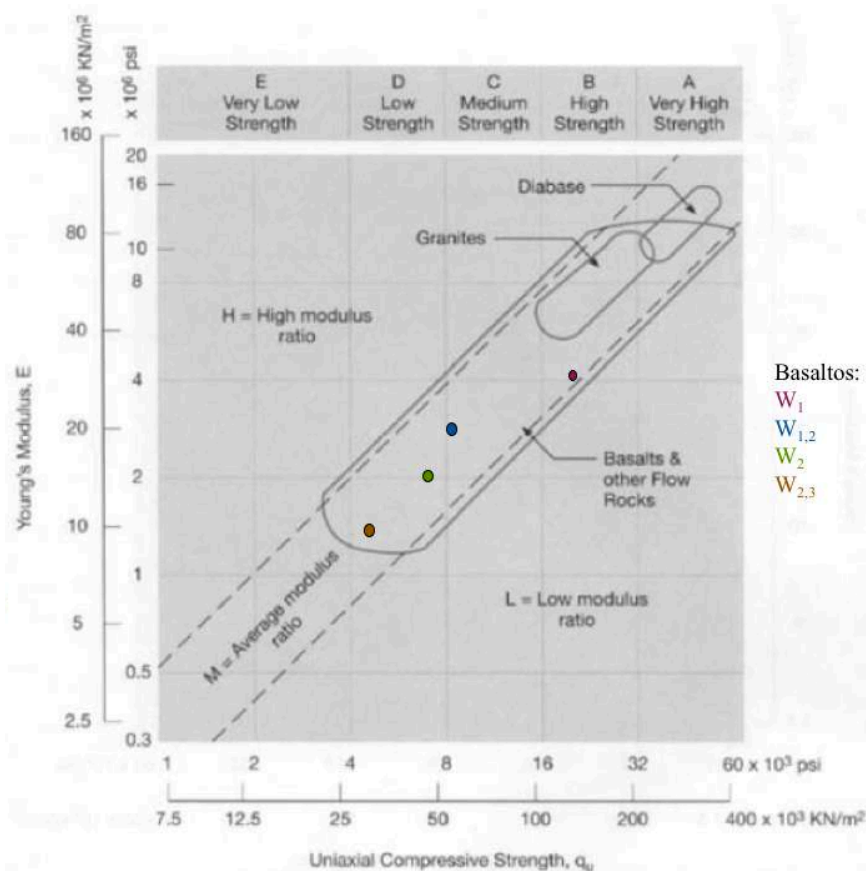


Figura 4.17 Projeção das amostras estudadas no ensaio de RCU no diagrama de Deere & Miller (1966)

Como referido na secção 3.2.3, o tipo de rotura é analisado no ensaio RCU - Figura 4.18. Visa averiguar de que forma a rotura dá indicações sobre a resistência do material, sabendo que esta depende da presença de veios preenchidos, fissuras fechadas e de microfissuras. A geometria do provete (paralelismo das faces e existência de pontos que levem à concentração de tensões) também influencia os resultados obtidos; contudo, segundo Szwedzicki (2006), de forma menos significativa do que a heterogeneidade da rocha intacta. As amostras analisadas correspondem a diferentes tipos de W e F tal como já referido. As rochas de melhor qualidade, nomeadamente BQ, têm uma rotura predominante por fracturação múltipla, um padrão que se deve à forte libertação de energia e que está concordante com os maiores níveis de resistência. Exibe ainda, para resistências menores, rotura por extensão múltipla (preferencialmente por tracção) e, quando os micro-defeitos têm maior influência, por cisalhamento. Os provetes da BLVI (W_{1-2}) rompem, na sua maioria, por cisalhamento simples, ou seja, a rotura tem tendência para ocorrer segundo planos singulares de fraqueza pré-existent. Resistências mais elevadas nestes provetes relacionam-se com cisalhamento múltiplo (quando há mais do que um plano de descontinuidade a participar na rotura) e por extensão múltipla, onde a tracção é o mecanismo prevalente. Tal como Szwedzicki (*op. cit.*) refere, este último tipo de rotura tende a associar-se a uma resistência relacionada com a rocha intacta e não tanto condicionada pelos planos de fraqueza. BLAI, amostra com o maior grau de alteração e fracturação, caracteriza-se por rotura por fracturação múltipla (também afectada pelas fissuras fechadas horizontais típicas desta amostra) e em extensão múltipla para provetes que oferecem maior resistência à compressão uniaxial. O cisalhamento múltiplo, por derivar de concentração de tensões em torno dos planos anisotrópicos e heterogéneos, associa-se a menores valores de σ_c , comparativamente à rotura em extensão simples. A excepção ocorre para um provete, onde a rotura se faz por cisalhamento simples e associada a valores de σ_c máximos nesta amostra. Pensa-se que as condições do ensaio ou a geometria do provete podem explicar esta situação. Por fim, a amostra BLVII ($W_{2,3}$) associa-se a roturas por cisalhamento (simples e múltiplo) dada a rede desenvolvida de veios e fissuras que se observam nos provetes e que têm clara influência nos resultados. Em síntese, o modo de rotura no ensaio de RCU reflecte a competência da rocha e a sua heterogeneidade, sendo que quando esta é maior, a rotura por cisalhamento tende a ser predominante, enquanto a rotura extensional prevalece nos provetes que exibem menos veios e fissuras. As observações estão de acordo com as registadas por Szwedzicki (*ib.*).

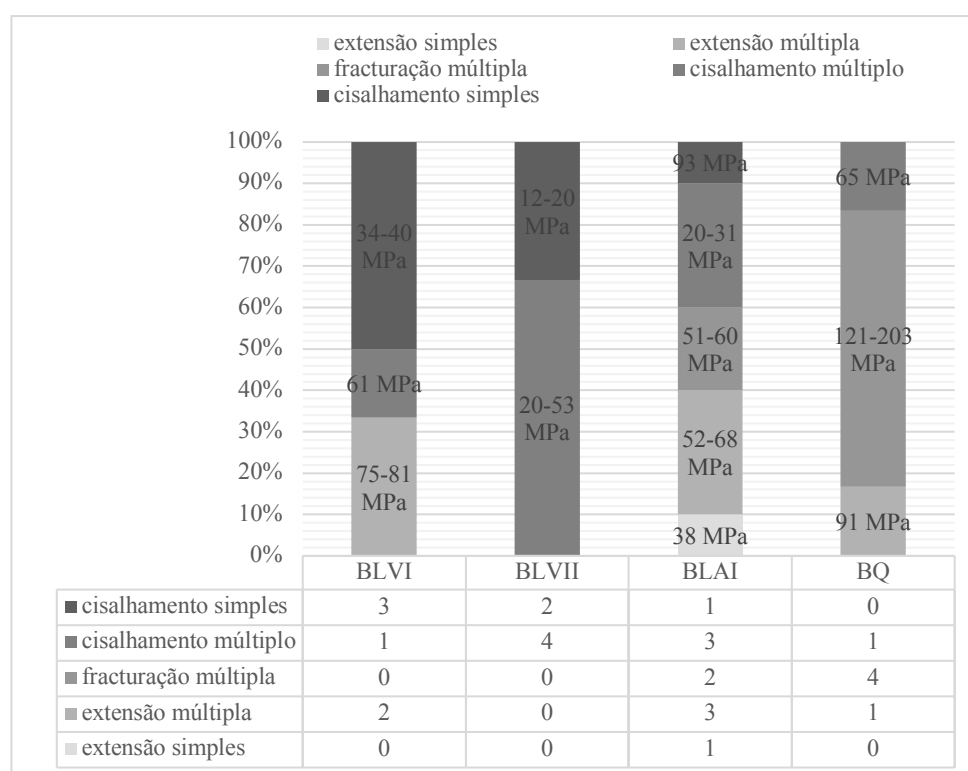


Figura 4.18 Tipos de rotura obtidas nos ensaios de RCU

Resistência à compressão pontual

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão pontual constam do Apêndice D.2, juntamente com as matrizes fotográficas dos provetes após a rotura. A Tabela 4.7 sintetiza os resultados através das principais estatísticas de síntese. As sugestões para apresentação dos valores variam para a ISRM (1985) e para a ASTM D5731-08 (2008). Na última, considera-se que devem ser desprezados os dois valores máximos e mínimos da amostra para fins de cálculo, sendo que para amostras mais reduzidas (como BLAII e BM), apenas se retira um máximo e um mínimo. A ISRM (1985) sugere que se considerem todos os valores, o que conduz a magnitudes de desvio-padrão e de coeficiente de variação mais elevadas. Considera-se a abordagem da norma americana mais adequada, visto diminuir a variabilidade nos resultados. Realizaram-se um total de 118 medições.

Tabela 4.7 Resultados obtidos no ensaio de compressão pontual segundo a norma ASTM D5731 (2008)

Amostra	Nº. medições	IS ₅₀ (MPa)				
		Máximo	mínimo	média	desvio-padrão	CV
BLVI	17	9,76	3,03	6,80	1,91	0,28
BLAI	20 (22 com 2 inválidas)	7,55	2,01	5,31	1,76	0,33
BLAII	10	7,83	3,47	5,55	1,50	0,27
BQ	19	18,25	11,55	16,00	1,57	0,10
BM	11	16,43	5,66	14,22	3,11	0,22
BA	41 (2 provetes com dimensão desajustada dos 43)	1,23	0,20	0,67	0,30	0,44

Os resultados mostram que o grau de alteração diminui o IS_{50} , não havendo exceções. BLAI e BLAII mostram-se muito semelhantes do ponto de vista do seu comportamento face à compressão pontual, comprovando que têm W igual (W_2). As rochas BM e BQ, tipicamente W_1 , mostram-se significativamente mais resistentes neste ensaio face às restantes amostras (cerca do dobro). Em contrapartida, as rochas amigdalóides e anastomosadas exibem valores de IS_{50} muito reduzidos, como seria de esperar.

Os valores obtidos face à bibliografia apresentada na secção 2.3.2 - Tabela 2.12, mostram concordância com os resultados publicados, principalmente para as amostras W_1 (BQ e BM). Verifica-se, tal como anteriormente, que amostras do CVL com menor W (face aos basaltos da literatura) podem exibir maior resistência à compressão pontual e vice-versa. Para um contexto geológico e geográfico mais aproximado, confirma-se que os basaltos amostrados da Pedreira da Moita da Ladra estudados por Soares *et al.* (2002) são tipicamente W_{1-2} , apresentando valores ligeiramente superiores, mas próximos, aos obtidos para BLVI.

Complementarmente, determinou-se o modo como ocorre a rotura nos provetes ensaiados (Figura 4.19). A rotura singular dá-se segundo o plano de carregamento, e gera uma fractura plana na zona central do provete. Esta é comum nas amostras com menor grau de alteração, isto é W_{1-2} (BLVI) e W_1 (BQ e BM), podendo associar-se a uma vasta gama de IS_{50} . Os valores mínimos verificam-se quando existem fissuras centrais nos provetes em que é aplicado o carregamento, resultando na sua rápida fracturação e de forma planar. Os valores máximos ocorrem quando as amostras não são tão condicionadas pela fracturação e a elevada energia de deformação armazenada no material, ao libertar-se, conduz à geração de fracturas planares que unem os pontos de impacto. O padrão de rotura irregular, menos comum nestas amostras, normalmente associa-se a valores menores de IS_{50} e é marcado por um desvio da fissura face ao centro. Nas amostras BLA, onde o grau de alteração e fracturação é superior, apesar de a rotura singular ser também comum, as fissuras fechadas e os veios preenchidos constituem zonas preferenciais de rotura e que conduzem a planos de fractura irregulares, tornando-o mais curvo, irregular ou menos central. Basu *et al.* (2013) concluem que esta rotura é pontual para as litologias por

eles estudadas. Explicam-na como resultado da propagação selectiva de fracturas segundo caminhos influenciados pela microestrutura e que permitem a mais fácil libertação de energia. Esta é, efectivamente, muito frequente para os basaltos do CVL, em especial os BA, onde as fissuras fechadas e os veios preenchidos (com diversas espessuras) constituem zonas de rotura preferenciais e que se apresentam em volume significativo. A rotura irregular, bem como a singular associadas a planos de fraqueza prévios e centrais, relacionam-se com menores valores de Is_{50} . A rotura em junção tripla é atribuída por aqueles autores (*op. cit.*) a valores de Is_{50} mais elevados, sendo o resultado da elevada libertação de energia de deformação. Esta observação não é, contudo, evidente para as amostras ensaiadas, sendo que a junção tripla pode associar-se tanto a valores superiores como a valores inferiores de Is_{50} , mesmo dentro da mesma amostra, dependendo, tal como nos restantes tipos de rotura, dos veios preenchidos, fissuras fechadas e da própria microestrutura. Apesar dos padrões observados, o modo de rotura mostra-se, muitas vezes, errático e contrário ao esperado e descrito por Basu *et al.* (*op. cit.*). Para as amostras do CVL, infere-se que o tipo de rotura nem sempre é descritível de uma determinada situação, sendo variável e muito condicionado pela estrutura dos provetes, explicando a gama vasta de valores de Is_{50} para cada modo de rotura.

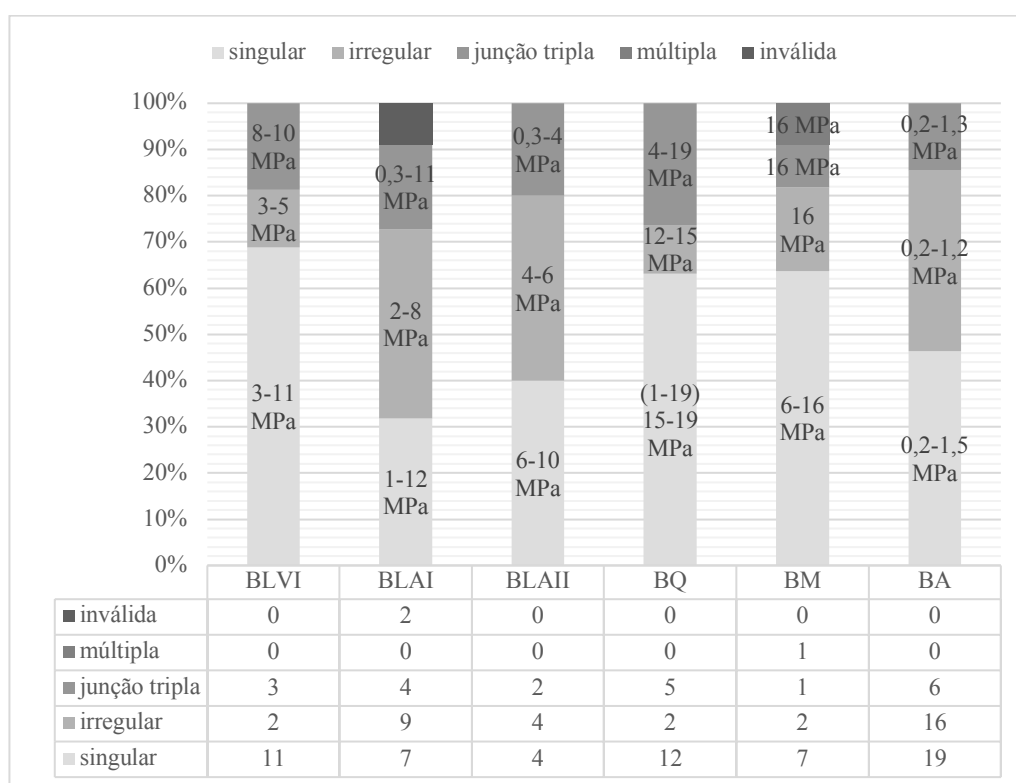


Figura 4.19 Tipos de rotura obtidas no ensaio de RCP

Resistência à tracção indirecta

Todos os resultados do ensaio brasileiro encontram-se no Apêndice D.3 juntamente com as imagens dos provetes após a rotura, tal como é indicado pela norma ASTM D3967-08 (2008). A Tabela 4.8 apresenta o resumo dos dados através de estatísticas síntese. Realizaram-se 88 medições no total.

A resistência à tracção vai depender do estado de alteração e da fracturação, tal como as restantes grandezas. As fissuras, preenchidas ou não, constituem zonas de fraqueza através das quais os provetes têm tendência a romper. Verifica-se em inúmeros provetes ensaiados que a tendência é, efectivamente, fracturar por estas zonas explicando, em parte, o modo de rotura. Quanto ao estado de alteração, conclui-se que quanto maior, menor é a resistência à tracção. As excepções ocorrem para amostras BLV, onde a área é superior e ocorre uma sobreestimação dos resultados. Isto deve-se, provavelmente, a erros na

execução do ensaio, podendo a taxa de carregamento não ter sido adequada e demasiado rápida (mesmo apesar de ser menor face à das restantes amostras) o que conduz a resistências mais elevadas e desajustadas para estas amostras. Note-se, igualmente, que BLVII apresenta grande variabilidade entre provetes, justificado pelo elevado coeficiente de variação. Para as restantes, a resistência diminui com o incremento de W e F. As duas amostras BLA comportaram-se de modo semelhante à tracção, comprovando a sua inclusão no mesmo grupo de grau de meteorização.

Tabela 4.8 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção indirecta e valores do teor em água na rotura

Amostra	N.º medições	σ_t (MPa)					w (%)				
		máximo	mínimo	média	desvio-padrão	Coeficiente de variação	máximo	mínimo	média	desvio-padrão	Coeficiente de variação
BLVI	14	44,38	20,09	35,25	7,13	0,20	3,39	0,72	1,66	0,70	0,42
BLVII	a	32,46	1,99	15,34	10,36	0,68	3,94	0,95	2,11	1,13	0,53
	b	12,86	1,22	6,01	4,97	0,83	4,35	2,75	3,57	0,65	0,18
	a+b	32,46	1,22	13,01	10,15	0,78	4,35	0,95	2,47	1,21	0,49
BLAI	21	19,08	5,55	10,31	3,59	0,35	2,57	0,86	2,10	0,38	0,18
BLAII	11	19,67	3,60	11,06	4,66	0,42	3,45	2,29	2,80	0,32	0,12
BQ	18	33,49	16,65	24,47	4,63	0,19	0,84	0,20	0,33	0,15	0,46
BM	12	44,89	19,28	31,86	7,71	0,24	0,44	0,13	0,31	0,10	0,31

O teor em água também é uma condicionante, estando relacionado com a porosidade. Conclui-se, para as amostras do CVL em estudo, que quanto maior a alteração e a fracturação, o teor em água é também superior. Este pode influenciar, mesmo que com baixa significância, a resistência à tracção, reduzindo-a. Não esquecer que, apesar da porosidade baixa das rochas basálticas, levando a uma influência menor da pressão intersticial em σ_t , esta pode ter uma importância acrescida no maciço, salientando, novamente, a questão do efeito de escala e da presença de descontinuidades.

Comparando os valores obtidos com os apresentados na bibliografia - Tabela 2.12, secção 2.3.2, conclui-se que eles estão de acordo com os registados por outros autores. Os basaltos do CVL ligeiramente alterados (W_2) - BLVII e BLA, têm resistência à tracção próxima da dos basaltos dos EUA (Schultz, 1995), dos basaltos W_3 da Índia (Gupta & Seshagiri-Rao, 1998; 2000), e dos basaltos moderadamente amigdalóides da África do Sul (Bell & Haskins, 1997). Além disso, aproximam-se do valor médio obtido por Soares *et al.* (2002) para os basaltos de Vialonga, também do CVL. Os basaltos do grupo W_1 - BQ e BM, e W_{1-2} - BLVI, têm valores próximos dos basaltos W_1 estudados por Gupta & Seshagiri-Rao (*op. cit.*). Estes também têm resistências semelhantes às calculadas para as várias rochas basálticas descritas por Hernández-Gutiérrez (2014), nomeadamente do BOPV e BPLM.

Os tipos de rotura verificados são, na sua maioria, múltipla central e a combinação de múltipla central com não central, como se pode verificar no gráfico da Figura 4.20. Os basaltos são rochas que apresentam uma resistência indirecta à tracção relativamente alta, o que explica a rotura múltipla central nos provetes. Esta ocorre, como Basu *et al.* (2013) descrevem para granitos, porque há um armazenamento elevado de energia na rocha, que se liberta gerando este padrão múltiplo. A rotura não central, maioritariamente associada à rotura múltipla central, deve-se à presença de zonas de fraqueza nos basaltos como fissuras fechadas e/ou veios preenchidos por calcite e zeólitos. Tal leva a que a rocha tenha tendência a romper primeiramente por essas superfícies e, muitas vezes, só posteriormente centralmente, e de forma múltipla, quando atinge o máximo de resistência à tracção. Verifica-se, igualmente, que estes dois tipos de rotura associam-se a valores de σ_t maiores e tomam maiores proporções nas rochas de melhor qualidade, isto é, BM e BQ (W_1) e BLVI (W_{1-2}). Note-se, tal como antes dito, que os valores para a amostra de BLV estão sobreestimados. Nas rochas W_2 (BLA) e $W_{2,3}$

(BLVII) observa-se mais tipos de rotura (não central, central e não central e múltipla central) relacionados com menores valores de σ_c . Estes derivam dos planos de fraqueza pré-existent na rocha. Conclui-se que o padrão de rotura dos provetes no ensaio brasileiro é condicionado, maioritariamente, pela rede de veios e fissuras que contém o provete, tal como nos restantes ensaios mecânicos.

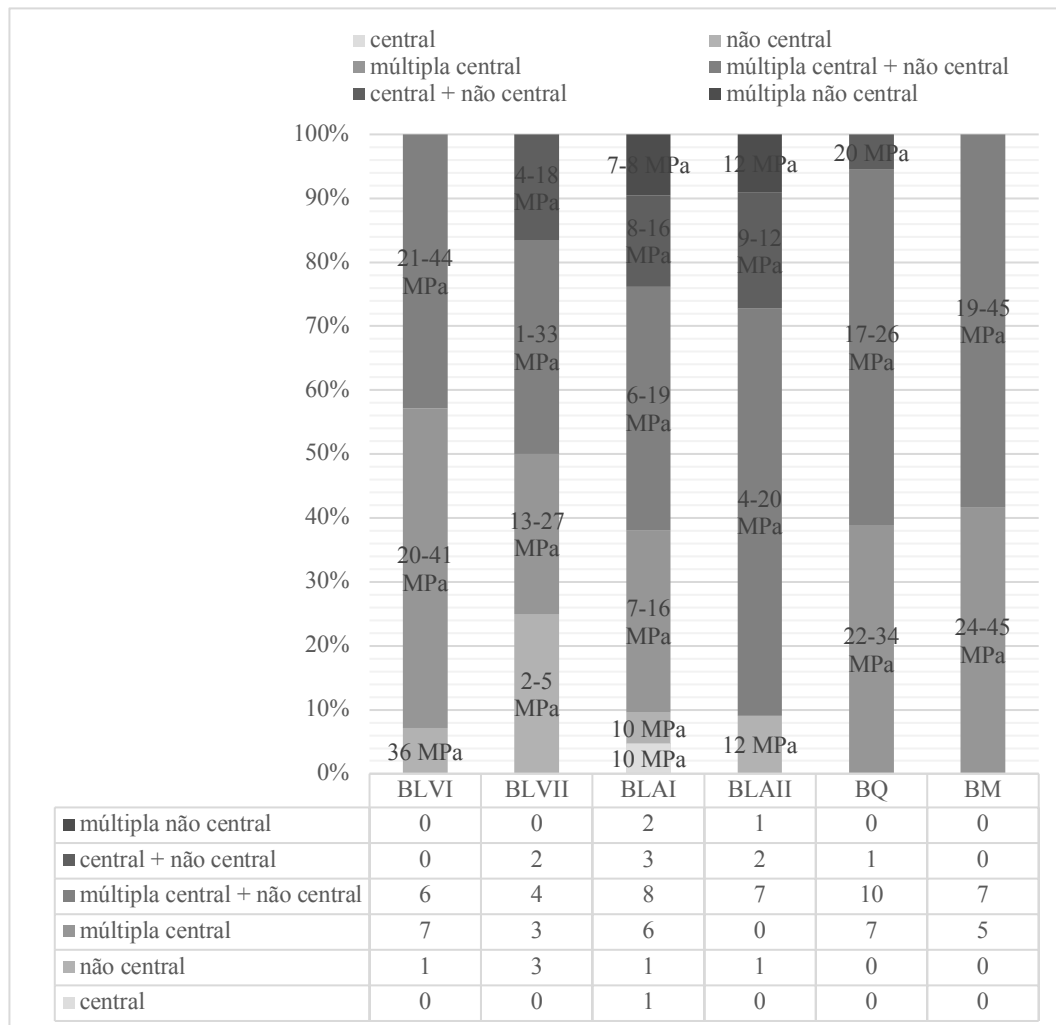


Figura 4.20 Tipos de rotura obtidas no ensaio de RTB

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO DE VIALONGA

Tal como descrito na secção 3.2.1, no maciço de Vialonga são caracterizadas 168 descontinuidades que se distribuem nas estações previamente descritas – Figura 3.18. Através do tratamento dos dados das descontinuidades geram-se diagramas de isodensidades bem como as rosetas das direcções das diaclases (em azimutes). Estes podem ser consultados na Figura 4.21, representando-os para cada estação. Suplementarmente, os parâmetros das descontinuidades sumarizam-se na Tabela 4.9. Note-se que para a sua obtenção se consideram as características médias ou predominantes. Isto significa que são escolhidas as categorias que têm maior representatividade e/ou que constituem valores intermédios entre outros mais extremados. Para mais fácil visualização, no Apêndice E ilustram-se os histogramas de cada característica por estação. Cada uma destas constitui uma frente de escavação descrita por uma orientação e uma resistência à compressão. Esta também tem importância nas classificações geomecânicas e baseia-se nas medições determinadas com o martelo de Schmidt do tipo L no campo e nos resultados dos ensaios de laboratório para obtenção das propriedades índice. A conversão dos valores é realizada com o ábaco de Miller apresentado na Figura A.2 dos Anexos. Considera-se, ainda, como peso volúmico da rocha 27 kN/m^3 , sendo este o valor determinado no ensaio de massa volúmica, peso volúmico e porosidade aberta, descrito na secção 4.1.2, para os basaltos com um grau de alteração semelhante ao do maciço em estudo, isto é, W_{1-2} (BLVI). A estação 1 (E1) associa-se a um talude de escavação com uma direcção de inclinação (As) de 164° e uma inclinação (Bs) de 82° , tendo-se obtido 131 MPa de σ_c . Por sua vez, a estação 2 (E2), tem um As de 169° , Bs igual a 86° e um valor de σ_c de 119 MPa . Em último lugar, a estação 3 (E3) caracteriza-se por um As de 154° , um Bs de 78° e uma resistência de 160 MPa .

Tabela 4.9 Descrição dos taludes para cada estação e das características das famílias de descontinuidades presentes

Família	Inclinação ($^\circ$)	Azimute de inclinação ($^\circ$)	Espacamento (mm)	Continuidade (m)	Abertura (mm)	JRC	Enchimento	Grau de alteração	Percolação de água
E1									
F1	73	322	20 a 60	< 1	0,25 a 0,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
F2	75	140	60 a 200	1 a 3	0,25 a 0,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F3	59	201	20 a 60	< 1	0,5 a 2,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
F4	23	162	60 a 200	< 1	0,5 a 2,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
F5 (II)	48	56	60 a 200	1 a 3	0,25 a 0,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
E2									
F1	80	346	60 a 200	3 a 10	0,5 a 2,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F2	84	138	200 a 600	<1	0,25 a 0,5	8 a 10	calcite	W_{1-2}	seco
F3	80	231	60 a 200	1 a 3	0,5 a 2,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F4	15	182	200 a 600	< 1	0,25 a 0,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F5	79	56	60 a 200	1 a 3	0,25 a 0,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
E3									
F1	89	321	200 a 600	1 a 3	0,5 a 2,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F2	36	165	60 a 200	< 1	0,25 a 0,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco
F3	73	211	60 a 200	3 a 10	0,5 a 2,5	6 a 8	calcite	W_{1-2}	seco
F4	11	239	60 a 200	< 1	< 0,1	2 a 4	calcite	W_{1-2}	seco
F5	63	52	60 a 200	3 a 10	0,25 a 0,5	4 a 6	calcite	W_{1-2}	seco

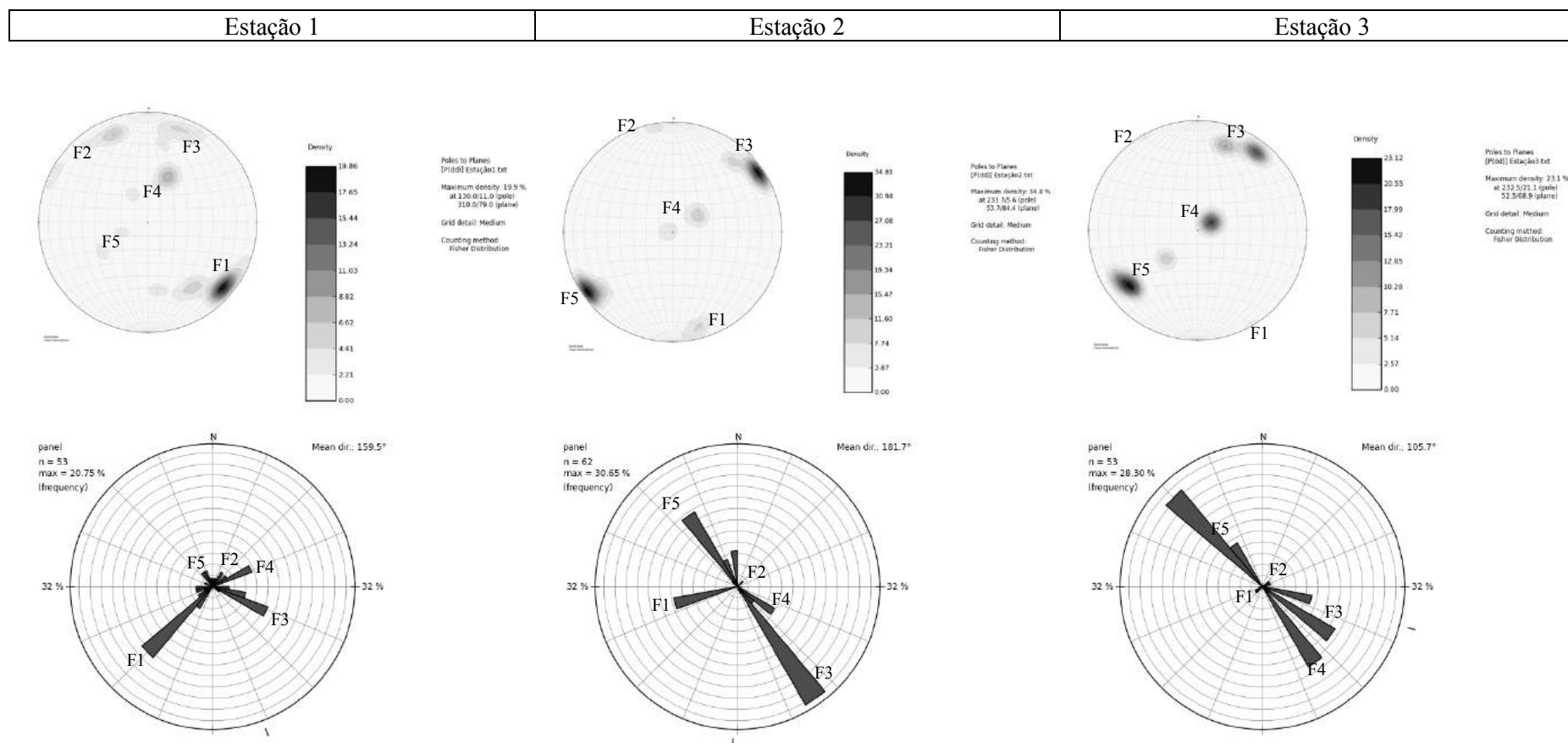
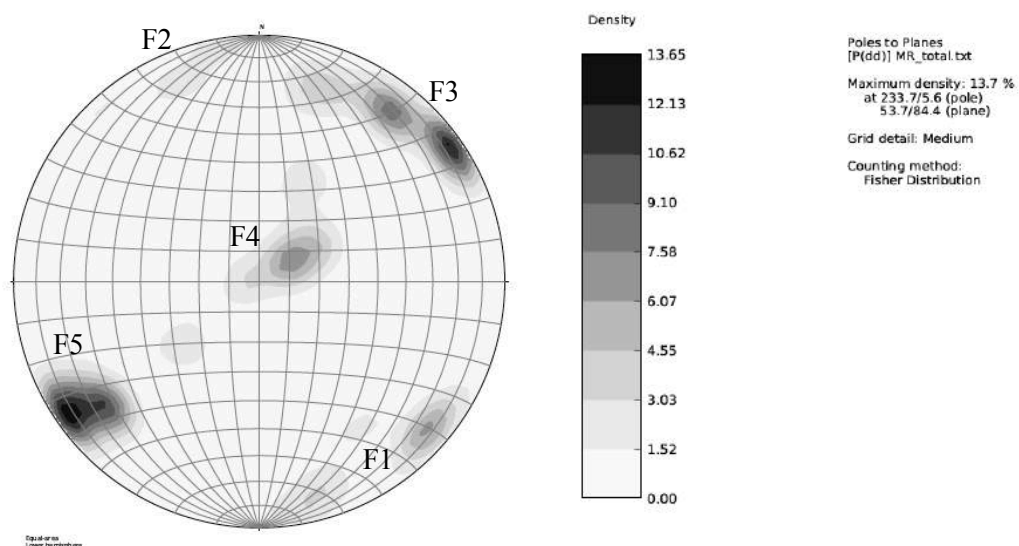


Figura 4.21 Diagramas de isodensidades e rosetas das direcções, em azimutes para as três estações em estudo, com referência das famílias de descontinuidades

O *software* utilizado permite o reconhecimento de um total de cinco famílias de diaclases (**F**). Este, contudo, não efectua um agrupamento automático dos pólos, sendo que se verifica que as famílias **F1** e **F2** e, também **F3** e **F5**, apresentam orientação semelhante e são subverticais, pelo que poderia simplificar-se o sistema de diaclases para três famílias principais. Opta-se por utilizar a subdivisão em 5 famílias devido às características diferentes de espaçamento e extensão de **F1** e **F2** e de **F3** e **F5**. A frequência, a atitude e as suas características físicas variam entre as estações. Note-se que **F1** e **F2** têm uma maior representatividade na primeira estação, perdendo-a nas restantes. Para **F1**, progressivamente, aumenta o espaçamento entre as diaclases da família, a sua continuidade e abertura e diminui o JRC. **F2** tem uma diminuição abrupta na inclinação na estação 3. As características das diaclases desta família mantêm-se relativamente similares. **F3** e **F5** têm grande representatividade nas estações 2 e 3. **F3** vai progressivamente aumentando o seu espaçamento, continuidade e abertura da estação 1 para a 3. Tem algumas variações na sua direcção (azimute). **F5** é pouco observável na estação 1, onde toma menor inclinação. Nas restantes verifica-se que aumenta a sua persistência. A família **F4** tem baixa inclinação e demonstra variações significativas no seu azimute de inclinação, principalmente devido à sua proximidade à horizontal. Nesta, as diaclases têm pequena abertura e persistência e variam de próximas a medianamente espaçadas.

O estudo é igualmente realizado considerando a totalidade das estações e uma resistência à compressão que advém da média dos valores médios do ressalto de cada família de diaclases, convertidos pelo ábaco da Figura A.2 dos Anexos. Obtém-se $\sigma_c = 133$ MPa. Na Figura 4.22 volta-se a ilustrar o diagrama de isodensidades e a roseta de descontinuidades, neste caso considerando a totalidade das estações. No total das 168 medições, observa-se as 5 famílias anteriormente descritas e respectivas direcções em azimutes nas rosetas. Complementarmente, apresentam-se as propriedades das famílias de diaclases (Tabela 4.10), evidenciando as características das descontinuidades, de natureza categórica, que predominam em todo o conjunto. Observa-se que o espaçamento das famílias é similar (à excepção de **F2**), bem como a continuidade e o JRC. A abertura é a variável que mais difere entre famílias. Conclui-se que para as várias famílias as diaclases variam de próximas a moderadamente próximas, sendo que têm uma continuidade muito baixa a baixa e uma abertura de parcialmente aberta a aberta.



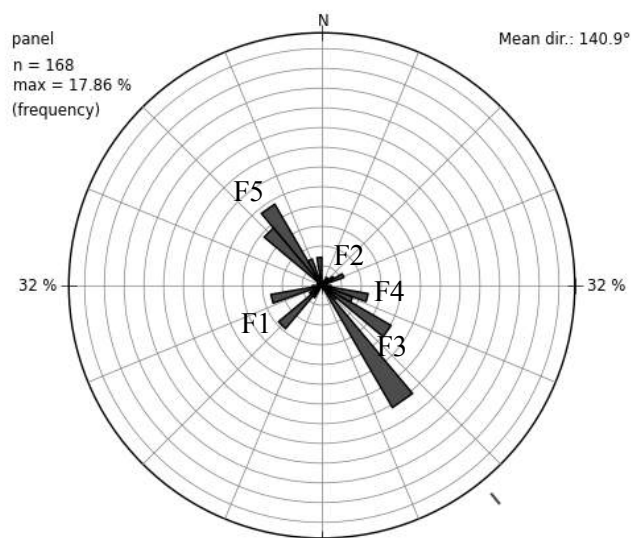


Figura 4.22 Diagramas de isodensidades e rosetas das direcções, em azimutes para a totalidade das estações em estudo, com referência das famílias de descontinuidades

Tabela 4.10 Síntese das características das famílias de descontinuidades presentes, considerando a totalidade das estações

Estação 1 + Estação 2 + Estação 3									
Família	inclinação (°)	Azimute da inclinação (°)	espaçamento (mm)	continuidade (m)	abertura (mm)	JRC	enchimento	Grau de alteração	Percolação de água
F1	76	328	60 a 200	1 a 3 m	0,5 a 2,5	4 a 6	calcite	W ₁₋₂	seco
F2	75	138	200 a 600	1 a 3 m	0,25 - 0,5	4 a 6	calcite	W ₁₋₂	seco
F3	73	211	60 a 200	1 a 3 m	0,5 a 2,5	4 a 6	calcite	W ₁₋₂	seco
F4	15	200	60 a 200	< 1	0,25 - 0,5 a 0,1-0,25	4 a 6	calcite	W ₁₋₂	seco
F5	68	57	60 a 200	1 a 3 m	0,25 - 0,5	4 a 6	calcite	W ₁₋₂	seco

A classificação gemecânica dos maciços tem, em parte, por base as características das diaclases. Adicionalmente, na maioria dos sistemas classificativos, é necessário contabilizar σ_c (MPa) obtido pelo o ábaco de Miller apresentado na Figura A.2 dos Anexos. Por vezes, também, implicam apresentar uma quantificação do RQD, sendo este determinado em função do espaçamento entre descontinuidades (Figura A.3 dos Anexos). O Jv (índice volumétrico das descontinuidades) foi analisado visualmente no campo, sendo que se tem cerca de 11 a 15 descontinuidades por m. Complementarmente, usa-se a Equação 4.1 (Palmstrom, 2005) para calcular o Jv em função do RQD, obtendo-se um intervalo de valores entre 14 e 24 descontinuidades por m³.

$$Jv = \frac{110 - RQD}{2,5} \quad (4.1)$$

Na Tabela 4.11 apresentam-se as classificações geomecânicas RMR, VRS e VRFSR aplicadas em cada estação. A primeira classificação é adequada em escoadas (Del Potro & Hürlimann, 2008), enquanto as restantes foram desenvolvidas especificamente para rochas vulcânicas. Importa referir que para o cálculo do RMR foi considerada a situação de talude e, para o VRFSR, dada a natureza do maciço e a sua verticalidade, usa-se o cenário de tombamento. Em todas as estações verifica-se que o sistema RMR é menos conservativo face aos restantes sistemas próprios para maciços vulcânicos, estando os últimos do lado da segurança. Enquanto para a maioria das descontinuidades o RMR classifica o maciço como rocha boa, os sistemas geomecânicos de maciços vulcânicos, por contabilizarem a orientação e estabilidade dos blocos face ao afloramento, consideram a rocha de qualidade razoável e potencialmente estável, porém não longe do limite para a rocha boa (quer VRS, quer VRFSR). Para o RMR e para o VRS, nas três estações, verifica-se que a família que diminui a qualidade do maciço é F2 dada a sua direcção, porém não esquecer que esta tem frequência diminuta nas estações 2 e 3. O sistema VRFSR considera que a família F1 é a que mais potencia a instabilidade do maciço (considerando o tombamento), uma vez que neste sistema se contabiliza a inclinação das diaclases face à do talude do afloramento. Tal como para F2, esta família tem maior representatividade na estação 1, perdendo-a nas restantes. Conclui-se que esta é a secção potencialmente mais instável das estudadas. As restantes secções não dispõem, contudo, de medidas parciais de protecção, como redes metálicas e suporte. Se se procura uma classificação que promova a segurança e seja mais conservativa para o caso do CVL, deve-se optar pela VRS e VRFSR de acordo com as características que se observam na pedreira.

Tabela 4.11 Classificação do CVL com os sistemas geomecânicos RMR, VRS e VRFSR para as três estações em estudo no maciço em que se encontra a Pedreira de Moita da Ladra

Classificação geomecânica de um afloramento do CVL							
Estação 1							
Família	RMR			VRS		VRFSR	
	RMRb	RMR	Classe	VRS	Classe	VRFSR	Classe
F1	69	69	II	72	III	55	III
F2	69	44	III	59	III	61	III/II
F3	68	63	II	69	III	61	III/II
F4	71	66	II	69	III	65	II
F5	70	65	II	68	III	61	III/II
Estação 2							
Família	RMR			VRS		VRFSR	
	RMRb	RMR	Classe	VRS	Classe	VRFSR	Classe
F1	66	66	II	70	III	35	IV
F2	75	50	III	67	III	56	III
F3	68	63	II	70	III	56	III
F4	73	68	II	73	III	60	III
F5	70	65	II	72	III	56	III
Estação 3							
Família	RMR			VRS		VRFSR	
	RMRb	RMR	Classe	VRS	Classe	VRFSR	Classe
F1	68	68	II	72	III	44	III/IV
F2	69	44	III	59	III	60	III
F3	65	60	III/II	69	III	57	III
F4	69	64	II	69	III	61	II/III
F5	65	60	III/II	68	III	57	III

Aplicando os sistemas geomecânicos à totalidade das estações, observa-se que os resultados obtidos em termos de comportamento geomecânico são relativamente semelhantes considerando cada estação ou todas em conjunto (Tabela 4.12). As conclusões também estão concordantes com as anteriores, pois o RMR continua a mostrar-se menos conservativo para este maciço face ao VRS e VRFSR (Tabela 4.12). Para se estar do lado da segurança e quando se trata de maciços basálticos, deve-se optar por estes dois últimos. A família F2 é a que se mostra mais desfavorável considerando os sistemas RMR e VRS, enquanto F1 é a que favorece a possível ocorrência de tombamento segundo o VRFSR. O maciço é constituído por uma rocha de qualidade razoável próxima dos limites que a separam de rocha de qualidade boa. Conclui-se que o maciço vulcânico em estudo, tal como diversos autores referem (por exemplo González de Vallejo *et al.* 2008), apresenta heterogeneidade, neste caso, estrutural, pois apenas inclui basalto na sua constituição. As descontinuidades, com diferentes orientações e características e, potencialmente, de origem distinta, levam a que o maciço do BV ou maciços semelhantes do CVL apresentem uma complexidade que deve ser contemplada em estudos de engenharia. Apesar de não terem sido considerados os níveis piroclásticos do CVL por extravasarem o âmbito da dissertação, eles incrementam aquela complexidade em termos estruturais e litológicos.

Tabela 4.12 Classificação do maciço BV segundo os sistemas geomecânicos RMR, VRS e VRFSR para a totalidade das estações

Classificação geomecânica da frente de escavação do BV									
Família	RMR			VRS		VRFSR			
	RMRb	RMR (taludes)	Classe	VRS	Classe	E1	E2	E3	Classe
F1	66	68	II	73	III	44	51	39	III
F2	69	44	III	64	III	60	60	60	III
F3	66	61	II	71	III	57	57	57	III
F4	69	64	II	74	III	65	65	65	II
F5	67	62	II	72	III	58	58	58	III

A observação das três estações permite caracterizar de forma qualitativa o maciço. Recorrendo à descrição de Terzaghi & Peck (1949), está-se perante um maciço moderadamente compartimentado, pois as diaclases e fracturas estão pouco afastadas, diferenciando-se blocos com cerca de 1 m de lado. As fissuras estão, na sua maioria, preenchidas por calcite (algumas vezes argila) e a rocha apresenta uma dureza e resistência características de um basalto, com uma alteração tipicamente W_{1-2} e que se manifesta, essencialmente, na zona superficial do maciço. Neste maciço, o imbricamento dos blocos é elevado e não é exercida pressão lateral. Segundo a classificação de GSI (Marinos *et al.* 2005) - Figura A.4 dos Anexos; o maciço é descrito como contendo blocos com fracturas afastadas, de dimensão média a pequena (“very blocky”) e mais do que uma família de descontinuidades. Atendendo ao estado de alteração e à qualidade da rocha, determina-se um $GSI = 50 - 60$. O GSI modificado (Sonmez & Ulusay, 2002) é também obtido com recurso a um ábaco- Figura A.5 dos Anexos, sendo que neste caso se calcula o SRC (*Surface Condition Rating*) dado pela equação 4.2, obtendo-se um valor de 11 devido às condições das fracturas. Desta forma, o valor de GSI modificado varia entre 45 e 55, intervalo com valores ligeiramente inferiores ao determinado previamente e que espelham uma pior condição das descontinuidades face ao valor de GSI original.

$$SRC = Rr + Rw + Rf \quad (4.2)$$

Onde: Rr (*roughness rating*) = 2; Rw (*weathering rating*) = 5; Rf (*infilling rating*) = 4.

Os valores determinados para o GSI (não modificado) são mais baixos do que os definidos para os basaltos $W_{1,2}$ da Madeira (Lourenço *et al.*, 2010), geologicamente mais recentes. Com efeito, os basaltos em apreço apresentam meteorização classificada como $W_{2,3}$ e $W_{3,4}$. Assim, os basaltos

madeirenses não só apresentam melhores características em termos de alteração, como o forte diaclasamento do maciço do CVL em Vialonga contribui para um decréscimo na qualidade geotécnica dos basaltos que o integram.

Quanto ao *software* utilizado, importa salientar as suas limitações, referindo-se o facto de utilizar a distribuição de Fischer automaticamente como método de contagem. Esta não é recomendada para este tipo de fenómeno.

4.3 CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS

A secção em causa tem como finalidade analisar as correlações prévias publicadas na literatura e a sua adequação aos basaltos do CVL, culminando na contribuição de novas correlações estatísticas para esta litologia na secção 4.3.3.

4.3.1 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS COM AS FÍSICAS E MECÂNICAS DA ROCHA INTACTA

A avaliação microscópica, em etapa preliminar, é bastante útil para compreender melhor o material em estudo. Sabe-se, também, que as características microscópicas têm influência nas propriedades físico-mecânicas dos materiais, referenciando-se a composição mineral, a textura (granularidade e hábitos dos cristais), bem como o grau de fracturação (fissuras e tipo de contacto entre cristais) e grau de alteração (Tuğrul & Zarif, 1999). Os estudos executados nesta área são expostos na secção 2.3.1, verificando-se que não existem trabalhos semelhantes para basaltos.

As rochas basálticas do CVL, dada a sua fracturação e alteração, dificultam a obtenção de um número mínimo de provetes para a execução dos ensaios, principalmente mecânicos. Uma avaliação microscópica e a determinação de correlações que permitissem concluir sobre as características físicas e mecânicas do material poderia ser interessante, contudo não foi possível realizá-lo. Na descrição das lâminas opta-se por uma abordagem distinta e simplificada: a avaliação da textura, da microfissuração e da porosidade são puramente qualitativas e aplica-se o método semi-quantitativo para determinar o volume de minerais observados nas lâminas delgadas, e não a contagem de pontos que, de qualquer modo, é particularmente difícil ou mesmo impossível em rochas de granularidade muito fina. Resume-se, assim, a comparação das propriedades microscópicas com as características físicas e mecânicas das amostras na Figura 4.23.

Minerais secundários, como o zeólito, a serpentina e a idingsite, derivam da alteração do material. Adicionalmente, os zeólitos e os carbonatos podem também ser um indicativo da porosidade e da microfissuração. Na Figura 4.23, como tal, consideram-se as percentagens conjuntas de idingsite e serpentina e as de zeólito e de carbonatos individualmente, para cada grupo de W e F. As discrepâncias nestas percentagens advêm da dimensão do grão. Quanto mais fino, como em BQ e BM, mais difícil é estimar a percentagem de minerais. O mesmo sucede para a matriz de BA, sendo difícil concluir sobre os minerais secundários nesta. Isto conduz a sub e sobreestimações nos valores. Como referido, verifica-se que um aumento de grau de alteração é acompanhado por um incremento da porosidade e uma quebra nas resistências das amostras. O peso volúmico também tende a diminuir, contudo mantém-se em valores próximos para as amostras $W_{2,3}$ e W_2 . Excluindo BLVI, dado o seu maior grão face às restantes amostras, conclui-se que o grau de serpentinização e formação de idingsite, bem como os zeólitos podem ser indicativos do grau de alteração dos basaltos, variando positivamente com este. Por outro lado, também a percentagem de zeólitos acompanha o grau de fracturação, sendo a correlação menor com os carbonatos. Estes tomam maiores proporções para a textura amigdalóide (BA). Apesar dos zeólitos e do conjunto idingsite e serpentina apresentarem-se concordantes com a variação da porosidade, as correlações estatísticas são fracas, não sendo apresentadas. Conclui-se que os minerais

secundários têm grande relevância e espelham os efeitos da alteração e da microfissuração da rocha. Adicionalmente, uma avaliação prévia da textura, dimensão do grão e de microfracturas são importantes num estudo preliminar de engenharia, sendo necessária a sua quantificação para estabelecimento de correlações. Apesar de não ter sido o mais adequado, verifica-se que o método semi-quantitativo é prático e suficiente para essa caracterização inicial do material. Esta abordagem deverá ser estudada em maior detalhe para tentar melhorar as correlações.

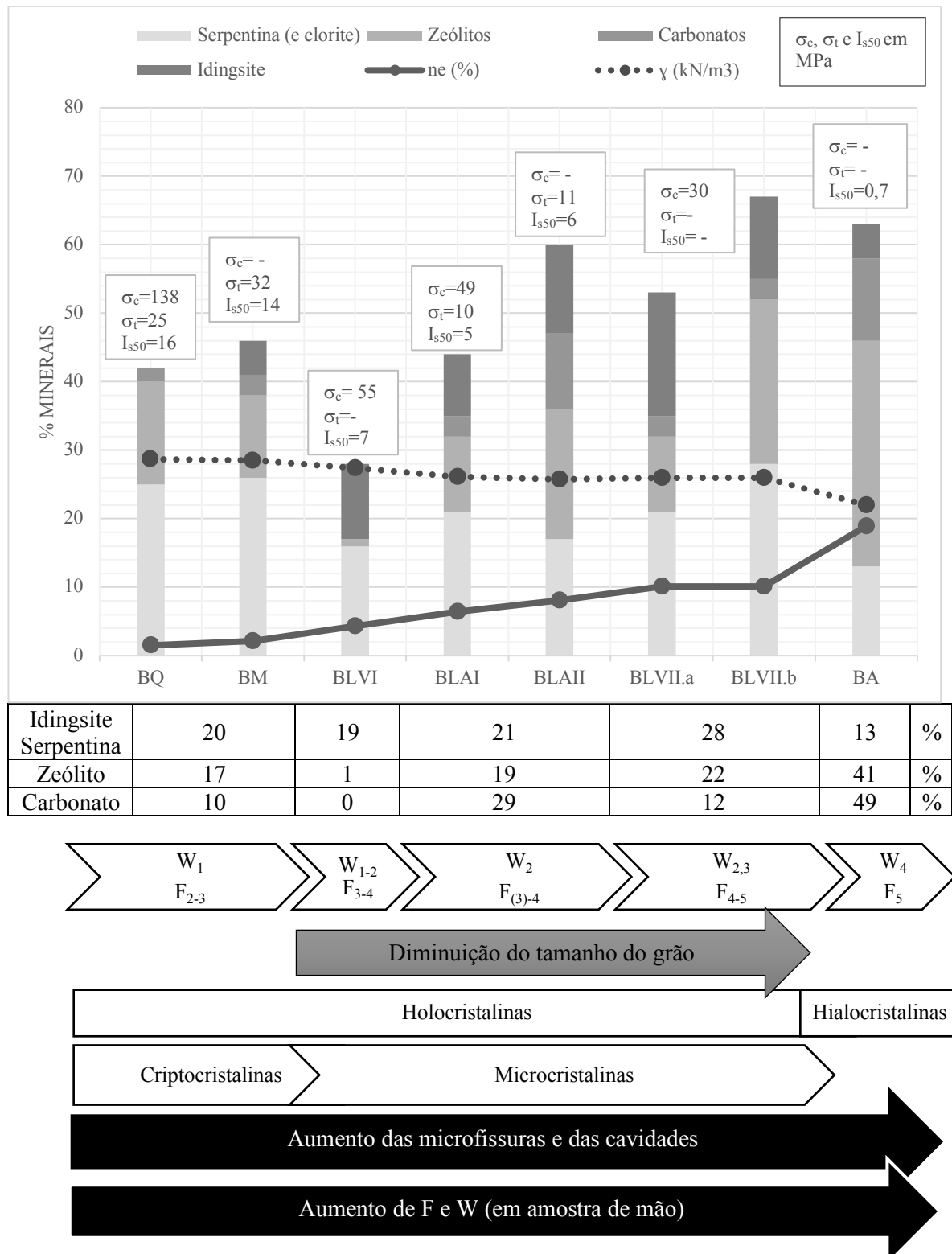


Figura 4.23 Relação das propriedades microscópicas (minerais secundários) e as características físico-mecânicas das amostras do CVL

4.3.2 CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS PRÉ-EXISTENTES

É analisada a aplicação das equações apresentada na Tabela 2.12 aos basaltos do CVL. Foram recalculadas as diversas grandezas e comparadas com os respectivos valores médios obtidos nos ensaios. A Tabela 4.13 resume as equações que se consideram apropriadas a serem aplicadas no CVL. Há sempre pequenas variações, isto é, sobreestimações e subestimações, que derivam de diferenças no grau de W e F. As equações propostas por Soares *et al.* (2002) mostram-se adequadas, apesar de diferenças ligeiras. Tal é evidente visto estas terem sido estabelecidas para os basaltos de Vialonga (BV). As restantes equações são, na sua maioria, definidas para basaltos das Ilhas Canárias, que se inserem num ambiente geodinâmico semelhante ao do CVL, porém oceânico. Estes basaltos, apesar da proximidade geográfica, associam-se a uma história e idade geológica distintas que levam a diferenças físicas e mecânicas. Tal explica porque é que algumas das equações propostas por Hernández-Gutiérrez (2014) e Rodríguez-Losada *et al.* (2007) não se adequam, enquanto outras sim.

Tabela 4.13 Correlações empíricas da literatura estabelecidas para basaltos e que se adequam às rochas do CVL

σ_c em função de R		
Hernández-Gutiérrez (2014)	$\sigma_c = 1,24\sigma_{cschmidt}$ $\log \sigma_{cschmidt} = 0,00034\gamma R + 0,0426\gamma - 0,0017R + 0,41$	Subestima os valores de σ_c para as amostras de qualidade melhor
σ_c em função de I_{s50}		
Soares <i>et al.</i> (2002)	$\sigma_c = 14,04I_{s50}$	Sobreestima σ_c ligeiramente: adequada para basaltos menos fracturados
Rodríguez-Losada <i>et al.</i> (2007)	$\sigma_c = 13I_{s50}$	Idem o anterior, havendo maior aproximação aos valores de σ_c experimentais
σ_t em função de I_{s50}		
Soares <i>et al.</i> (2002)	$\sigma_t = 1,91I_{s50}$	Bastante adequada
E em função de σ_c		
Gupta & Seshagiri Rao (2000)	$E = \sigma_c^{0,98} \times 286$	Subestima E dos basaltos mais alterados e fracturados
E_d em função de σ_c		
Rodríguez-Losada <i>et al.</i> (2007)	$E_d = k_3 \times \sigma_c$, onde $k_3 = -2,7904 \sigma_c + 850,39$	Subestima E dos basaltos menos alterados e fracturados
k_1 - coeficientes de correlação entre σ_c e I_{s50} ; k_3 – equação de correlação entre E_d e σ_c		

4.3.3 CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS PARA O CVL

Visto que as correlações publicadas se restringem essencialmente aos basaltos para os quais foram criadas, a obtenção de correlações específicas para o CVL é importante. A presente secção apresenta algumas, expondo a lógica e a metodologia para a sua obtenção. A apresentação é feita de forma parcelada, em função da natureza dos parâmetros a partir dos quais se estimam outras propriedades índice. Novas correlações facilitam a caracterização de rocha intacta em trabalhos futuros de engenharia que envolvam o CVL, possibilitando a diminuição no número de ensaios dispendiosos e que envolvam uma preparação de provetes rigorosa e difícil (o que se verifica acontecer para estes basaltos) ou até a sua não execução em fases de estudo preliminares.

Diversas propriedades em estudo nos basaltos do CVL são muito afectadas pela fracturação. Como tal, os resultados médios obtidos para cada amostra ensaiada incluem o efeito de F, sendo importante na apresentação dos resultados relativos à rocha intacta, mas dificultando o estabelecimento de correlações. Desta forma, habitualmente são definidos dois cenários de correlação: (i) um que deriva dos valores experimentais médios obtidos para cada amostra e (ii) outro que considera os valores correspondentes para cada provete, com posterior tratamento de dados. Este é necessário, pois ocorre uma elevada dispersão nas medições devido à fracturação que induz valores anómalos ou resistências subestimadas face ao que seria de esperar para um basalto com um determinado grau de alteração. Enquanto a primeira vertente espelha as condições experimentais dos provetes, a segunda leva à exclusão de valores que se considerem subestimados, para que representem a adequada resistência do material, não tão afectada pela fracturação. A determinação desta situação é importante, porque a fissuração no CVL é aleatória, quer em termos de proximidade quer em termos de orientação.

a) *Correlações estatísticas derivadas de parâmetros físicos (γ e n_e)*

Todos os gráficos relativos a estes parâmetros encontram-se no Apêndice F.1.

- Estimação de parâmetros de resistência (σ_c , σ_t e I_{s50})

Dado o valor de σ_c estar muito dependente do grau de F e da orientação das fracturas (a maioria dispõe-se diagonalmente nos provetes, levando a resistências baixas), opta-se por obter correlações para os valores experimentais médios de cada amostra e considerando cada provete individualmente (existindo uma correspondência directa entre σ_c e γ e n_e). O mesmo é feito para os ensaios RTB e RCP, para os quais nem sempre há uma correspondência directa com amostras ensaiadas em termos de γ e n_e . No primeiro, excluem-se os valores das amostras BLV por razões previamente referidas na secção 4.1.3. Para as diversas resistências consideradas em função das propriedades físicas, são ajustados dois tipos de modelo aos dados, um linear e outro exponencial, para cada cenário de tratamento de valores. A determinação do melhor modelo tem em conta o R^2 médio (coeficiente de determinação), que se pretende que seja o maior possível, de cada modelo e para os dois cenários de correlação. Para estes também se determina o somatório da soma dos resíduos (diferença entre o valor teórico obtido da correlação e o valor médio experimental) para avaliar o erro ou desvio. Conclui-se que as diversas resistências variam de forma positiva com γ e, na maioria dos cenários, mesmo apesar de um menor R^2 , os desvios são inferiores para o modelo linear, devendo este ser o escolhido. Note-se, contudo, que a sua aplicação é restrita a estados de alteração $\leq W_3$, devendo usar-se o ajustamento exponencial para amostras com elevada alteração e fracturação, como BA. Por outro lado, σ_c , σ_t e I_{s50} têm uma correlação negativa com n_e , tal como esperado, variando de forma exponencial com esta e adequando-se aos basaltos de CVL para todo o espectro de grau de alteração estudado. Todas as equações resumem-se na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Estimação de propriedades mecânicas de resistência em função de propriedades físicas

σ_c (MPa)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_c = 35,00\gamma - 877,88$ $R^2 = 0,87$	$\sigma_c = 0,0002e^{0,47\gamma}$ $R^2 = 0,89$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\sigma_c = 39,11\gamma - 937,71$ $R^2 = 0,90$	$\sigma_c = 0,0002e^{0,49\gamma}$ $R^2 = 0,76$
	Soma dos erros (MPa)	209	285
n_e (%)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_c = -11,72n + 134,03$ $R^2 = 0,79$	$\sigma_c = 150,99e^{-0,17n}$ $R^2 = 0,93$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\sigma_c = -14,25n + 199,19$ $R^2 = 0,96$	$\sigma_c = 259,47e^{-0,18n}$ $R^2 = 0,85$
	Soma dos erros (MPa)	208	175
σ_t (MPa)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_t = 6,43\gamma - 155,88$ $R^2 = 0,88$	$\sigma_t = 0,001e^{0,35\gamma}$ $R^2 = 0,92$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\sigma_t = 7,86\gamma - 187,77$ $R^2 = 0,83$	$\sigma_t = 0,001e^{0,37\gamma}$ $R^2 = 0,86$
	Soma dos erros (MPa)	29	28
n_e (%)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_t = -2,95n + 32,81$ $R^2 = 0,82$	$\sigma_t = 36,09e^{-0,16n}$ $R^2 = 0,86$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\sigma_t = -1,74n + 37,15$ $R^2 = 0,74$	$\sigma_t = 42,13e^{-0,11n}$ $R^2 = 0,91$
	Soma dos erros (MPa)	46	32
I_{s50} (MPa)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	$I_{s50} = 2,12\gamma - 47,86$ $R^2 = 0,80$	$I_{s50} = 3E-05e^{0,46\gamma}$ $R^2 = 0,97$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$I_{s50} = 2,33\gamma - 50,40$ $R^2 = 0,86$	$I_{s50} = 7E-05e^{0,44\gamma}$ $R^2 = 0,92$
	Soma dos erros (MPa)	19	22
n_e (%)	Valores médios de cada amostra	$I_{s50} = -0,78n + 13,46$ $R^2 = 0,73$	$I_{s50} = 18,84e^{-0,176n}$ $R^2 = 0,98$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$I_{s50} = -0,87n + 17,79$ $R^2 = 0,88$	$I_{s50} = 25,83e^{-0,17n}$ $R^2 = 0,94$
	Soma dos erros (MPa)	24	20

- Estimação de parâmetros de deformabilidade (E e ν)

Os valores de E e ν estáticos podem ser estimados a partir de γ e n_e , havendo correspondência directa entre os valores. O módulo considerado é o $E_{médio}$, pois o $E_{secante}$ tem sempre valores inferiores e $E_{tangente}$ apresenta, com maior frequência, valores anómalos. Estas grandezas são obtidas do ensaio RCU e, como referido, a fracturação do provete condiciona os resultados. Com isto apresentam-se, igualmente, o cenário dos valores médios de cada amostra e o cenário de correspondência directa dos resultados para cada provete; para ele faz-se um tratamento para diminuir a dispersão dos dados e excluir valores anómalos. Obtêm-se correlações adequadas aos basaltos do CVL em função da proximidade das fracturas - Tabela 4.15. Igualmente os parâmetros E e ν seguem uma correlação linear com γ , positiva e negativa, respectivamente. Mesmo apesar do valor de R^2 médio ser superior para o modelo exponencial, em E vs γ , os desvios são superiores, considerando-se a abordagem linear mais adequada e concordante com o que se verificou para as grandezas resistentes. A equação exponencial mostra-se mais favorável a amostras com grau de alteração superior a BLVII ($W_{2,3}$). Por outro lado, E varia de forma exponencial e negativamente com n_e , não se incluindo o ajustamento linear, onde a correlação é menor. Adicionalmente, desta maneira está em concordância com a variação apresentada

pelas propriedades resistentes com a porosidade. Contrariamente, ν apresenta uma relação linear positiva com o mesmo parâmetro físico. Note-se que, enquanto para E se consideraram muitas leituras (Apêndice F.1), para ν , dada a sua difícil obtenção, muitos resultados tiveram de ser excluídos. Isto leva a que sejam consideradas poucas amostras, havendo grande proximidade nas equações dos dois cenários distintos considerados e explicando o ajustamento linear dos dados.

Tabela 4.15 Estimação das propriedades de deformabilidade em função de propriedades físicas

E _{médio} (GPa)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	E = 7,47γ - 182,31 R ² = 0,92	E = 0,0007e ^{0,37γ} R ² = 0,87
	Valores individuais dos provetes ensaiados	E = 8,51γ - 207,83 R ² = 0,83	E = 5E-05e ^{0,48γ} R ² = 0,91
	Soma dos erros (GPa)	11	15
n _e (%)	Valores médios de cada amostra		E = 38,97e ^{-0,14n} R ² = 0,99
	Valores individuais dos provetes ensaiados		E = 25,83e ^{-0,17n} R ² = 0,94
	Soma dos erros (GPa)		0
ν			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	ν = -0,02γ + 0,70 R ² = 0,85	
	Valores individuais dos provetes ensaiados		
	Soma dos erros	0	
n _e (%)	Valores médios de cada amostra	ν = 0,01n + 0,20 R ² = 0,94	
	Valores individuais dos provetes ensaiados		
	Soma dos erros	0	

- Estimação de parâmetros dinâmicos (V_p e E_d)

É também possível estabelecer uma correspondência directa entre alguns dos parâmetros dinâmicos (V_p e E_d) com γ e n_e . A velocidade de ondas longitudinais é, igualmente, influenciada pela rede de fracturas que intersectam os provetes e, como tal, considera-se o cenário dos valores médios por amostra e dos valores individuais dos provetes. O ajustamento linear produz, à partida, um R^2 muito superior face ao modelo exponencial, tanto para γ como n_e . Isto demonstra que há maior correlação dos dados, não se considerando o ajustamento exponencial nesta situação. Verifica-se que V_p varia positivamente com γ e negativamente com n_e . Para o primeiro caso, a correlação não é excelente, pois $R^2 < 0,81$. E_d tem correlação positiva com γ , verificando-se que para a gama de basaltos com menor alteração ($< W_3$) o ajustamento linear é adequado. O modelo exponencial, onde a correlação nos dados é menor, adequa-se a amostras com características similares a BA. Tal como para as outras propriedades, n_e apresenta um modelo exponencial adequado, variando negativamente com E_d . As correlações integram a Tabela 4.16.

Tabela 4.16 Estimação de propriedades dinâmicas em função de propriedades físicas

V _p (m/s)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	V _p = 733,9γ - 15045 R ² = 0,78	
	Valores individuais dos provetes ensaiados	V _p = 660,8γ - 12596 R ² = 0,78	
n _e (%)	Valores médios de cada amostra	V _p = -289,72n + 6419,9 R ² = 0,99	
	Valores individuais dos provetes ensaiados	V _p = -231,97n + 6531,7 R ² = 0,82	
E _d (GPa)			
γ (kN/m ³)	Valores médios de cada amostra	E _d = 16,96 γ - 404,37 R ² = 0,83	E _d = 0,0112e ^{0,31γ} R ² = 0,76
	Valores individuais dos provetes ensaiados	E _d = 17,20 γ - 405,71 R ² = 0,90	E _d = 0,0025e ^{0,37γ} R ² = 0,75
	Soma dos erros (GPa)	30	N/D
n _e (%)	Valores médios de cada amostra		E _d = 99,90e ^{-0,12n} R ² = 0,96
	Valores individuais dos provetes ensaiados		E _d = 92,01e ^{-0,09n} R ² = 0,88
	Soma dos erros (GPa)		21

b) Correlações estatísticas derivadas de parâmetros mecânicos

Todos os gráficos relativos a estes parâmetros encontram-se no Apêndice F.2.

- Estimação de parâmetros de resistência (σ_c , σ_t e Is_{50})

O ensaio RCP não é tão exigente em termos de preparação de provetes, contrariamente aos ensaios de RTB e, especialmente, de RCU. Desta forma, a estimação de σ_c e σ_t a partir de Is_{50} é vantajosa. Complementarmente, averigua-se a relação entre σ_t e σ_c , visto que, para obter o último, tem de se realizar um ensaio mais dispendioso e para o qual há exigências restritas quanto à forma e geometria dos provetes. Todas as equações da Tabela 4.17 se associam a modelos lineares, pois verificam-se boas correlações nos dados para eles (R^2 adequados), e porque na literatura as correlações estabelecidas são desta natureza.

Existe uma correspondência directa dos provetes participantes nos ensaios RTB e RCP. Mais uma vez, pela fracturação ter influência, principalmente, no ensaio de tracção indirecta, volta-se a definir correlações com os resultados médios obtidos por amostra. A associação dos resultados por provete teria o seu interesse, contudo, neste ensaio existe uma particularidade: os máximos registados para σ_t (excluindo BLV) correspondem a valores subestimados de Is_{50} devido à presença de microfissuras. As equações que se estabelecem neste cenário conduzem a valores teóricos de σ_t baixos. Em contrapartida, opta-se por uma outra abordagem. Nesta correspondem-se os valores máximos, mínimos e médios entre grandezas e para cada amostra, fazendo-se uma correspondência indirecta (ou de parâmetros estatísticos). Esta permite a obtenção de melhores correlações e um menor erro, evitando os problemas associados à correspondência directa. Tanto na abordagem dos valores médios como na da correspondência indirecta se consideram os resultados de Is_{50} e σ_t para BV (Soares *et al.*, 2002).

Nas restantes correlações criadas (σ_c vs I_{s50} e σ_c vs σ_t), não há uma correspondência directa entre provetes, seguindo-se as duas abordagens anteriores. Verifica-se que a correlação para a vertente de correspondência por parâmetros estatísticos é superior à obtida no cenário de valores médios. Adicionalmente, no primeiro a nuvem de pontos é mais extensa (Apêndice F.2). Em suma, opta-se exclusivamente pelas equações de correspondência indirecta. De salientar, ainda, que as propriedades mecânicas de resistência variam, entre si, positivamente, tal como esperado.

Tabela 4.17 Estimação de propriedades mecânicas de resistência por correlações entre si

σ_t (MPa)		
I_{s50} (MPa)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_t = 1,73I_{s50} + 1,55$ $R^2 = 0,84$
	Correspondência indirecta de valores por amostra	$\sigma_t = 2,08I_{s50}$ $R^2 = 0,96$
σ_c (MPa)		
I_{s50} (MPa)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_c = 7,75I_{s50} + 19,78$ $R^2 = 0,74$
	Correspondência indirecta de valores por amostra	$\sigma_c = 9,70I_{s50} + 11,49$ $R^2 = 0,90$
σ_c (MPa)		
σ_t (MPa)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_c = 5,59\sigma_t + 8,14$ $R^2 = 0,79$
	Correspondência indirecta de valores por amostra	$\sigma_c = 6,23\sigma_c + 2,87$ $R^2 = 0,91$

Não foi possível estabelecer qualquer correlação com os valores de resistência ao ressalto (R), existindo uma grande dispersão nos dados.

- Estimação de parâmetros de deformabilidade (E e ν)

Algumas prensas utilizadas nos ensaios de RCU obtêm exclusivamente σ_c . Perante este cenário, torna-se interessante obter correlações entre essa variável e E e ν estáticos - Tabela 4.18. Os resultados desses vários parâmetros advêm dos mesmos provetes e, novamente, devido ao efeito da fracturação, testam-se os dois cenários: o que considera os valores médios de cada amostra e o que se baseia na correspondência directa dos resultados para cada provete, com posterior tratamento de dados. Além disso, por razões especificadas antes (secção 4.1.3), considera-se $E_{médio}$. Verifica-se que este varia linearmente e positivamente com o valor de σ_c (o modelo exponencial não é tão apropriado). No capítulo das considerações finais, apresenta-se exclusivamente a equação estabelecida para a segunda abordagem, dado incluir um número de leituras superior (Apêndice F.2). O valor do ν varia, também, linearmente e de forma positiva. As correlações determinadas para estimar este parâmetro devem ser consideradas com cautela, pois para o cenário de valores médios a nuvem de pontos é muito reduzida e, na abordagem alternativa, R^2 não traduz uma correlação excelente, sendo inferior a 0,81. As equações são, além disso, muito semelhantes, podendo-se apresentar nas conclusões apenas a do segundo cenário.

Tabela 4.18 Estimação de propriedades de deformabilidade em função das de resistência

$E_{\text{médio}}$ (GPa)		
σ_c (MPa)	Valores médios de cada amostra	$E = 0,20\sigma_c + 5,64$ $R^2 = 0,96$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$E = 0,21\sigma_c + 4,92$ $R^2 = 0,90$
ν		
σ_c (MPa)	Valores médios de cada amostra	$\nu = -0,0005\sigma_c + 0,27$ $R^2 = 0,91$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\nu = -0,0005\sigma_c + 0,28$ $R^2 = 0,71$

c) *Correlações estatísticas derivadas de parâmetros dinâmicos*

Todos os gráficos relativos a estes parâmetros encontram-se no Apêndice F.3.

- Estimação de parâmetros de resistência (σ_c)

Tal como já salientado, o ensaio RCU exige uma preparação cuidadosa de provetes e é mais dispendioso. A determinação de σ_c através de grandezas dinâmicas obtidas em ensaios não destrutivos é menos exigente na dimensão dos provetes. A disposição dos dados revela que o modelo exponencial é mais favorável à relação entre V_p e σ_c , estendendo-se para todos os graus de alteração e fracturação dos basaltos do CVL. Estas duas variáveis variam de modo positivo, tal como previsto. Havendo correspondência directa entre os dados, obtêm-se as equações para os resultados médios por amostra e para os resultados por provetes. Para a última, excluem-se valores que se mostrem desajustados - Tabela 4.19. Além disso, este cenário é mais adequado face ao primeiro pois, apesar do R^2 ser ligeiramente inferior, a nuvem de pontos mais alargada e a soma dos resíduos é inferior à do primeiro cenário.

Para ser estabelecida uma correlação entre V_s e σ_c , tem de se excluir um número elevado de pontos, obtendo-se uma correlação que não é excelente. Opta-se por apresentar apenas os gráficos no Apêndice F.3. Além disso, como anteriormente foi apresentado, $V_s = 0,53V_p$ considerando 5 amostras e $V_s = 0,55V_p$ considerando as 4 menos alteradas.

Em σ_c vs E_d , volta-se a determinar as equações para os dois cenários distintos. O modelo linear, com variação positiva, ajusta-se melhor aos dados, contudo, tal como em casos anteriores, o modelo exponencial tem de ser aplicado em amostras com W_3 ou superior.

Mais uma vez, a abordagem dos valores médios é mais apropriada para amostras com fracturas próximas, cujos resultados são afectados por elas, enquanto a abordagem alternativa é adequada para amostras com fracturas afastadas.

Tabela 4.19 Estimação de propriedades de resistência em função de propriedades dinâmicas

σ_c (MPa)			
V_p (m/s)	Valores médios de cada amostra		$\sigma_c = 3,64e^{0,0006V_p}$ $R^2 = 0,91$
	Valores individuais dos provetes ensaiados		$\sigma_c = 2,85e^{0,0007V_p}$ $R^2 = 0,88$
σ_c (MPa)			
E_d (GPa)	Valores médios de cada amostra	$\sigma_c = 1,95E_d - 37,35$ $R^2 = 0,94$	$\sigma_c = 13,53e^{0,03E_d}$ $R^2 = 0,99$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$\sigma_c = 3,19E_d - 125,45$ $R^2 = 0,95$	$\sigma_c = 4,16e^{0,04E_d}$ $R^2 = 0,91$
	Soma dos erros (MPa)	-66	-72

- Estimação de parâmetros de deformabilidade (E)

Visto ser apenas determinado no ensaio RCU, é útil obter E estático a partir de E_d . Estas duas variáveis relacionam-se de forma linear e positivamente e são determinadas para os dois cenários já referidos (Tabela 4.20). De forma a cobrir todos o espectro de alteração dos basaltos do CVL, a fórmula é calculada considerando a ordenada na origem nula. A abordagem dos valores individuais exibe maior número de pontos no gráfico (Apêndice F.3) e é mais adequada quando os provetes em causa têm uma rede de fracturas mais afastadas.

Tabela 4.20 Estimação do módulo de elasticidade estático através do homólogo dinâmico

$E_{médio}$ (GPa)		
E_d (GPa)	Valores médios de cada amostra	$E = 0,37E_d$ $R^2 = 0,97$
	Valores individuais dos provetes ensaiados	$E = 0,40E_d$ $R^2 = 0,89$

Não foi possível obter uma correlação adequada entre ν e o respectivo homólogo dinâmico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Os basaltos são rochas ígneas extrusivas com uma abundância significativa na superfície terrestre, sendo como tal alvo de intervenção humana. Estas rochas têm um contexto geodinâmico e associam-se a processos geológicos posteriores que condicionam as características do material que o constitui. São rochas satisfatórias para fins de engenharia, contudo os maciços que os contêm são susceptíveis a uma meteorização rápida, sendo comum uma fracturação intensa e uma alteração destas rochas. A sua caracterização geotécnica, quer no campo com sistemas classificativos, quer em laboratório com a realização de ensaios destrutivos e não destrutivos, é oportuna. Existem vários estudos desta vertente feitos para basaltos, no entanto, a assinatura particular do ambiente em que se formam é vincada e muitas das características destas rochas não podem ser extrapoladas de local para local, resultando numa vasta gama de correlações estatísticas.

O CVL tem uma importante expressão em Lisboa e seus arredores. Tem 72 Ma e integra na sequência do magmatismo que afecta a Bacia Lusitaniana, ocorrendo nas últimas fases de *rifting* desta. Como tal, enquadra-se num contexto temporal e estrutural síncrono com a abertura do Oceano Atlântico, sendo típico de um ambiente intraplaca continental. Inclui na sua constituição escoadas lávicas intercaladas com níveis piroclásticos, estando os seus relevos muito alterados por fenómenos erosivos. Os basaltos são o material predominante. Dada a importância deste complexo, e o facto de ser palco de frequentes obras de engenharia, também futuras, o seu estudo geotécnico de campo e de laboratório é importante. Pretendeu-se, assim, com esta dissertação contribuir para melhorar o conhecimento do CVL nesta perspectiva, que é ainda escasso.

As amostras em estudo foram apresentadas de acordo com o seu local de amostragem em Lisboa e envolvente. Algumas advêm de tarolos de sondagem disponibilizadas à FCT-UNL e à FCUL, enquanto outras foram amostradas, no âmbito desta dissertação, como blocos junto a afloramentos deste complexo. Os blocos foram caroteados em laboratório de modo a obter provetes com diâmetro superior a 55 mm, e todos eles foram cortados de forma a obedecer às recomendações da ISRM e às normas ASTM para a dimensão e forma necessários à execução de ensaios de caracterização física e mecânica de rocha intacta. O agrupamento das amostras, apesar de referidas em função do seu local de origem – S. Sebastião, Pontinha-Falagueira, Parque Florestal de Monsanto, Queijas e Alcântara - foi feito em função do grau de alteração e fracturação – Figura 5.1, características com influência nos resultados dos ensaios subsequentes.

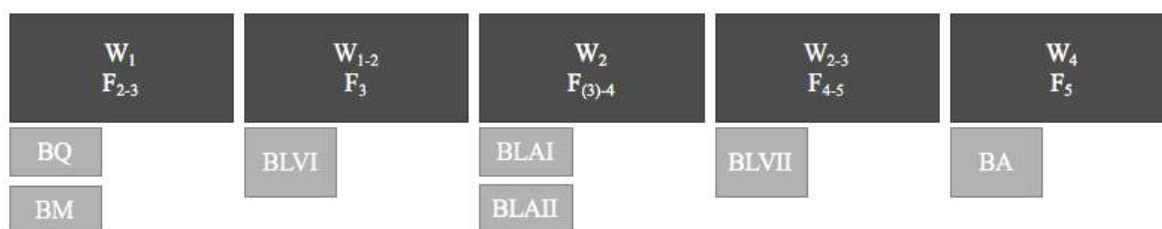


Figura 5.1 Amostras analisadas e seu agrupamento segundo o grau de alteração e fracturação

A Figura 5.1 resume os diversos materiais, salientando-se que as amostras foram descritas em amostra de mão, mas também analisadas microscopicamente, numa fase preliminar do processo de caracterização de rocha intacta. Tal permitiu avaliar em maior detalhe a textura e a composição das amostras, que se sabe serem algo variáveis para os basaltos do CVL. Identificaram-se termos holocristalinos (W₁ a W_{2,3}) e hialocristalinos (W₄). Em termos de granularidade, observaram-se rochas afaníticas equigranulares (W₂) ou rochas afaníticas porfíricas em que a dimensão dos fenocristais e

dos cristais da matriz pode ir de muito fina (W_1) a média (W_{1-2}). Como texturas especiais, é frequente a sub-ofítica e ofítica e, para a amostra W_4 , a textura amigdalóide. A mineralogia demonstrou a sua tendência alcalina, exibindo fenocristais de olivina e augite, esta por vezes titanífera (BLVII). Na matriz ocorre augite, plagioclase, opacos, olivina, biotite (rara), apatite, zeólitos, feldspato alcalino (raro), feldspatóide e vidro vulcânico (amostra BA). Nas rochas africanas observadas (BLA), a quantidade de plagioclase é próxima ou similar à de augite, constituindo termos mais evoluídos. Os minerais secundários e/ou tardios têm uma grande relevância num estudo geotécnico de rochas. Para as amostras em causa, verificou-se uma alteração de natureza oxidante e hidrotermal, responsável pela alteração de olivina para idingsite e para o conjunto serpentina e clorite, respectivamente. Também as augites se podem alterar para esta associação mineralógica. Esta pode ainda ocorrer a preencher veios na matriz. A fracturação intergranular foi visível nas plagioclases, ocorrendo no seu interior zeólitos, mineral tardio e que pode associar-se a um baixo grau de metamorfismo. Este foi habitualmente observável como preenchimento das fissuras ou cavidades, podendo ocorrer juntamente com carbonatos. Estes dois minerais são indicativos do grão de fissuração e da porosidade das amostras, atingindo o seu máximo na textura amigdalóide onde surgem a preencher as cavidades das rochas. Apesar da avaliação semi-quantitativa constituir um método possivelmente eficaz para estudos preliminares de engenharia, não foi possível estabelecer correlações entre a mineralogia e as propriedades físicas da rocha, nomeadamente com a porosidade.

O estudo de rocha intacta constituiu a componente principal da dissertação relembando-se que, no seu conceito, está inerente a menor relevância das fracturas. O seu comportamento é, predominantemente, função das características mineralógicas (e químicas), físicas e mecânicas, resultando estas de processos geológicos de origem, e posterior a esta. Foram executados diversos ensaios físicos, mecânicos e dinâmicos para o caracterizar, seguindo-se as recomendações da ISRM e as normas da ASTM quanto às dimensões e forma dos provetes, ao procedimento e apresentação de resultados. Salienta-se que não foi possível a realização de todos os ensaios em todas as amostras, pois a obtenção de provetes em número mínimo e de acordo com os requisitos estabelecidos naqueles documentos mostrou-se difícil para os basaltos do CVL dado o respectivo grau de alteração e, principalmente, de fracturação. Todos os resultados estão dentro da gama de valores definidos por diversos autores para outros basaltos. As discrepâncias entre os vários resultados derivam da assinatura própria de cada basalto, apresentando uma variabilidade que é influenciada por diversos factores, como o contexto geodinâmico e tectónico em que se forma e a idade e a história geológica que lhes está inerente, onde os processos tectónicos e de alteração (quer meteórica quer hidrotermal) actuam de forma diferenciada. A intervenção humana também pode constituir um processo erosivo nestas rochas.

Dos ensaios não destrutivos, sumarizados na Tabela 5.1, o primeiro a ser realizado foi o ensaio de dureza ao ressaltamento em blocos não caroteados, nomeadamente em 5 blocos da amostra BQ, 6 blocos de BM e 5 blocos de BA (nos quais em 3 deles se ensaiam 2 faces distintas). Para BV realizaram-se medições nas 3 estações definidas em campo. Obteve-se um total de 421 medições, para as quais se averiguou diferentes métodos de tratamento de dados relacionados com o reconhecimento de *outliers*. Visto estes derivarem de asperezas na superfície da rocha ou de constrangimentos de dimensão dos blocos, foram identificados e não considerados nos valores finais pois não espelham a heterogeneidade da rocha. Verificou-se que o método de Peirce é mais preciso do que o método de Chauvenet. O método dos quartis, apesar de menos sensível, também pode ser aplicado complementarmente visto usar uma abordagem de cálculo distinta. No ensaio de ultrassons ensaiaram-se as amostras destinadas ao ensaio RCU e adicionalmente a amostra BA, totalizando 35 medições. Nestas foram determinando V_p , V_s , E_d e v_d . O ensaio para determinação da porosidade aberta, peso e massa volúmica fez uso de amostras irregulares com massa superior a 50 g, tendo parte das amostras correspondência directa com os provetes para o ensaio de RCU, outra parte representativa de grupos de provetes destinados aos ensaios RTB e RCP. Ensaaiaram-se, no total, 80 fragmentos.

Tabela 5.1 Valores médios obtidos para os ensaios não destrutivos

Amostras de basalto do CVL		Propriedades físicas		Dureza ao ressalto (R)	Propriedades dinâmicas			
		γ aparente (kN/m ³)	n_e (%)		V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_d (GPa)	v_d
W ₁	BQ	28,68	1,48	41	5945	3421	85,54	0,20
	BM	28,50	2,14	48				
	BQ +BM	28,59	1,81	45				
W ₁₋₂	BLVI	27,43	4,26		5126	2670	52,81	0,15
	BV			48				
W ₂	BLAI	26,12	6,41		4735	2748	50,50	0,14
	BLAII	25,77	8,07					
	BLA	25,95	7,24					
W _{2,3}	BLVII	25,96	10,13		3413	1787	28,22	0,23
W ₄	BA	22,38	18,93	28	1196	550	N/D	N/D

Tabela 5.2 Valores médios obtidos para os ensaios destrutivos

Amostras de basalto do CVL		Propriedades mecânicas						
		RCU				RTB		RCP
		σ_c (MPa)	$E_{médio}$ (GPa)	ν	w (%)	σ_t (MPa)	w (%)	I_{s50} (MPa)
W ₁	BQ	137,91	33,06	0,22	0,39	24,47	0,33	16,00
	BM					31,86	0,31	14,22
	BQ +BM					28,17	0,32	15,11
W ₁₋₂	BLVI	58,36	19,87	0,25	1,24	N/D	1,66	6,80
W ₂	BLAI	48,81	15,97	0,26	1,81	10,31	2,10	5,31
	BLAII					11,06	2,80	5,55
	BLA					10,69	2,45	5,43
W ₂₋₃	BLVII	29,75	9,66	0,28	2,59	N/D	2,47	
W ₄	BA							0,67

Dos ensaios destrutivos, o ensaio de RCU envolveu um total de 28 leituras válidas, determinando-se σ_c , E e ν . Salienta-se a obtenção difícil de provetes para este ensaio, quer em número, quer em termos de geometria e forma. Além disso, na maioria dos provetes, os veios dispunham-se diagonalmente, entre 45° a 30° com o eixo maior do provete, diminuindo a resistência que as amostras ofereciam à compressão uniaxial. Verificou-se que, para menores estados de alteração, os basaltos exibem um comportamento frágil; porém, com o incremento de W e F, o seu comportamento passa a semi-frágil, identificando-se uma tensão de cedência para estes provetes. Isto deve-se aos efeitos dos planos de heterogeneidade, tendo sido estes responsáveis por valores baixos de σ_c , mas também pela discrepância entre os diferentes módulos obtidos. O $E_{secante}$ engloba os efeitos de recompressão e de ajuste dos pratos da prensa, sendo sempre inferior aos outros. Para $E_{tangente}$, ocasionalmente, ocorrem valores anômalos, mostrando $E_{médio}$ as magnitudes mais adequadas e que difere da anterior dada a heterogeneidade do material. Esta dificultou também a obtenção de ν , não tendo sido determinado para todos os provetes ensaiados.

No ensaio de RTB realizaram-se 88 medições, excluindo-se os valores de BLV por se mostrarem desajustados dado a erros relacionados com parâmetros do ensaio. O ensaio de compressão pontual foi feito para um total de 119 provetes, abrangendo ensaios axiais nos provetes de tarolos ou caroteados, e ensaios em fragmentos prismáticos, irregulares, para as amostras BA, cuja obtenção de provetes foi

muito dificultada pela sua natureza facilmente desagregável. A Tabela 5.2 inclui os resultados médios obtidos para estes ensaios.

Complementarmente, averiguou-se de que forma os tipos de rotura podem dar indicações sobre a resistência que o provete oferece, variando em função da energia acumulada no material e com o estado de fracturação. No ensaio de RCU, o modo de rotura foi concordante com a competência da rocha e sua heterogeneidade. Basaltos de maiores resistências apresentam fracturação múltipla, enquanto as extensões múltiplas e simples tendem a ocorrer para resistências ligeiramente menores. Provetes com maior heterogeneidade e alteração associam-se a rotura por cisalhamento dada a concentração de tensões em torno das superfícies de fraqueza. No ensaio de RCP, concluiu-se que o tipo de rotura nem sempre é descritível de uma determinada situação, tendo-se modos de rotura similares para diferentes gamas de valores de I_{s50} . Por último, na tracção indirecta ocorreu essencialmente rotura múltipla central para elevadas resistências, podendo associar-se a não central quando existiam zonas de fraqueza pelas quais os provetes fissuraram antes de atingir a tensão de pico. Os restantes modos de rotura, que se associam a valores menores de σ_t , advêm de veios e fissuras que conduziram os provetes à rotura final.

Estudadas por Soares *et al.* (2002) do ponto de vista mecânico, as amostras BV são basaltos pertencentes ao maciço onde lavra a Pedreira da Moita da Ladra, Vila Franca de Xira. Aqui, um afloramento foi alvo de um estudo de campo para avaliar o maciço vulcânico e compreender quais os sistemas classificativos que melhor se adaptam a ele. Com efeito, os maciços diferem da rocha intacta, pois, para além da sua natureza e da distribuição dos materiais que os constituem, existe um conjunto de descontinuidades que os afectam e que devem ser estudadas para fins de engenharia. Os maciços vulcânicos, em particular, podem conter heterogeneidade estrutural e litológica que deve ser tida em conta, sendo comum incluírem níveis de escoadas e depósitos piroclásticos, tal como acontece no CVL. No afloramento estudado apenas se reconheceu basaltos, de competência adequada (W_{1-2} , com descoloração nas fracturas e presença de uma oxidação na superfície exposta da rocha) mas que contém uma rede de descontinuidades que condicionam a sua estabilidade. Identificaram-se cinco famílias de descontinuidades, na sua maioria próximas, com continuidade baixa e uma abertura variável, entre parcialmente aberta a aberta. São pouco rugosas e exibem um preenchimento carbonatado a argiloso, apresentando-se todas sem percolação de água. Em função das características em estudo concluiu-se que, do ponto de vista geomecânico, o maciço é constituído por rocha razoável na transição para uma qualidade boa. A rede de fracturas tem grande influência e concluiu-se que os sistemas VRFSR e VRS são mais conservativos e adequados a este maciço. Em trabalhos futuros do CVL e respectiva caracterização geomecânica, aconselha-se o uso destas classificações, uma vez que contabilizam a orientação das fracturas face à do talude. O efeito das descontinuidades e a compartimentação do maciço levou à obtenção de um GSI= 60 – 50 e de um GSI modificado entre 55 e 45. Isto evidencia que, apesar da competência adequada, a rede de descontinuidades diminui a qualidade geotécnica do maciço.

Pelo facto dos basaltos do CVL serem afectados por fissuras, quer macroscópicas, quer microscópicas, a obtenção de provetes para estas rochas, principalmente as com piores estados de W e F, é difícil. O estabelecimento de correlações estatísticas novas entre propriedades índice tem utilidade para qualquer estudo de engenharia aqui a ser efectuado. Note-se que apesar de existirem diversas correlações para basaltos na literatura, estas tendem a restringir-se às amostras para as quais foram estabelecidas, limitando a sua aplicação. Desta forma, definiram-se novas equações que devem ser empregues para basaltos deste complexo ou outros com características similares. Estas resumem-se na Tabela 5.3. Para as mesmas propriedades índice apresentaram-se diferentes correlações que derivam de um método de cálculo diferente, dependendo se existe correspondência directa ou não dos resultados e do grau de fracturação do material.

Existem diversos trabalhos futuros que podem advir desta dissertação. Em termos de estudo da rocha intacta, esta pode ser ainda mais alargada para os basaltos, principalmente os de pior qualidade para ampliar a gama de valores obtidos, mas também para melhorar as correlações. Sugere-se que o estudo petrográfico seja mais aprofundado, nomeadamente de forma a quantificar a variação de

minerais secundários e da microfissuração com a propriedades físico-mecânicas, não tendo sido possível realizá-lo nesta dissertação. Adicionalmente, pelo facto de o CVL ser heterogêneo e incluir escoadas lávicas intercaladas com níveis piroclásticos, sugere-se o estudo destes materiais piroclásticos para contribuir com novos valores de propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas para este complexo. Isto cobriria a maioria das litologias do CVL, sendo que o seu estudo geotécnico não se deve restringir apenas à rocha intacta, mas alargar-se para o campo, envolvendo volumes mais significativos, com classificação de afloramentos que contenham esta heterogeneidade estrutural e litológica típica de maciços vulcânicos.

Tabela 5.3 Correlações estatísticas para os basaltos do CVL

Propriedades a partir das quais se estima		Correlações	Fracturas próximas		Fracturas não próximas	
			k1	k2	k1	k2
Propriedades físicas	γ (kN/m ³)	$\sigma_c = k1\gamma - k2$ $\sigma_c = 0,0002e^{0,47\gamma}$ (para $W \geq W_3$)	35,00	877,88	39,11	937,71
		$\sigma_t = k1\gamma - k2$ $\sigma_t = 0,001e^{0,35\gamma}$ (para $W \geq W_3$)	6,43	155,88	7,86	187,77
		$Is_{50} = k1\gamma - k2$ $Is_{50} = 3E-05e^{0,46\gamma}$ (para $W \geq W_3$)	2,12	47,86	2,33	50,40
		$E = k1\gamma - k2$ $E = 5E-05e^{0,48\gamma}$ (para $W \geq W_3$)	7,47	182,31	8,51	207,83
		$\nu = -0,02\gamma + 0,70$				
		$\nu_p = k1\gamma - k2$	733,9	15045	660,8	12596
		$E_d = k1\gamma - k2$ $E_d = 0,0025e^{0,3675\gamma}$ (para $W \geq W_3$)	16,96	404,37	17,20	405,71
	n_e (%)	$\sigma_c = k1e^{-k2n}$	150,99	0,17	259,47	0,18
		$\sigma_t = k1e^{-k2n}$	36,09	0,16	42,126	0,11
		$Is_{50} = k1e^{-k2n}$	18,84	0,18	25,83	0,17
		$E = k1e^{-k2n}$	39,00	0,14	25,83	0,17
		$\nu = 0,01n + 0,20$				
		$\nu_p = -k1n + k2$	289,72	6420	231,97	6531
		$E_d = k1e^{-k2n}$	99,90	0,12	92,01	0,09
Propriedades mecânicas	Is_{50}	$\sigma_t = k1Is_{50} + k2$	1,73	1,55	2,08	0
		$\sigma_c = k1Is_{50} + k2$	7,75	19,78	9,70	11,49
	σ_t	$\sigma_c = k1\sigma_t + k2$	5,59	8,14	6,23	2,87
	σ_c	$E = k1\sigma_c + k2$	0,20	5,64	0,21	4,92
		$\nu = -k1\sigma_c + k2$			0,0005	0,28
Propriedades dinâmicas	V_p	$\sigma_c = k1e^{k2V_p}$	3,64	0,0006	2,85	0,0007
	E_d	$\sigma_c = k1E_d - k2$ $\sigma_c = k1e^{k2E_d}$ (para $W \geq W_3$)	1,95	37,35	3,19	125,45
		$E = k1E_d$	0,37		0,40	
k1 e k2 correspondem a constantes obtidas nos diversos cenários de correlação						

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggitalis, G., Alivizatos, A., Stamoulis, D. & Stournaras, G. (1996) 'Correlating uniaxial compressive strength with schmidt hardness, point load index, Young's modulus, and mineralogy of gabbros and basalts (Northern Greece)', *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (54), pp. 191–193.
- Allaby, M. (2013) *A dictionary of geology and earth sciences*. 4th ed. Edited by M. Allaby. Oxford, UK: Oxford University press.
- ASTM D2216-05 (2005) 'Standard Test Method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass 1', *ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 1–7. doi: 10.1520/D2216-10.N.
- ASTM D2845-08 (2008) 'Standard Test Method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock', *ASTM International, West Coshohocken, PA*, p.7. doi: 10.1520/D2845-08.
- ASTM D3967-08 (2008) 'Standard Test Method for splitting tensile strength of intact rock core specimens', *ASTM International*, (November), p. 3. doi: 10.1520/D3967-08.2.
- ASTM D5731-08 (2008) 'Standard Test Method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications', *ASTM International. West Conshohocken, PA*, p. 11. doi: 10.1520/D5731-08.2.
- ASTM D5873-05 (2005) 'Standard Test Method for determination of rock hardness by rebound hammer', *ASTM International, West Conshohocken, PA*, p. 3. doi: 10.1520/D5873-13.2.
- ASTM D7012-07 (2007) 'Standard Test Method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures', *ASTM International*, p. 23. doi: 10.1520/D7012-13.1.
- Aydin, A. (2009) 'ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), pp. 627–634. doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974) 'Engineering classifications of rock masses for the design of rock support', *Rock Mechanics*, 6(4), pp. 189–236.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. & Zanettin, B. (1986) 'A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram', *Journal of Petrology*, 27(3), pp. 745–750. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Basu, A., Mishra, D. A. & Roychowdhury, K. (2013) 'Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (72), pp. 457–475. doi: 10.1007/s10064-013-0505-4.
- Bell, F. G. (1992) *Engineering in Rock Masses*. 3rd ed. Edited by F. G. Bell. Butterworth-Heinemann Limited. doi: 10.1016/B978-0-7506-1965-3.50018-2.
- Bell, F. G. (2007) *Engineering Geology*. 2nd ed. Edited by Elsevier. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

- Bell, F. G., De Graaf, P. J. H. & Haskins, D. R. (1995) 'A geotechnical survey of phase 1A of the Lesotho Highlands Water Project', *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28(4), pp. 317–332. doi: 10.1144/GSL.QJEGH.1995.028.P4.02.
- Best, M. G. (2013) *Igneous and Metamorphic Petrology*. 2nd ed. Blackwell Publishing. Available at: <https://books.google.pt/books?id=fwbl7pXAbh0C>.
- Bieniawski, Z. T. (1989) *Engineering rock mass classifications*. New York: John Wiley & Sons.
- BS EN, 1936:2006 (2007) 'Natural stone test methods - determination of real density and apparent density, and of total and open porosity', *British Standards, BSI*, p. 14.
- D.R. Haskins & F.G. Bell (1995) 'Drakensberg basalts: their alteration, breakdown and durability', *Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology*, 28(October 2010), pp. 287–302. doi: 10.1144/GSL.QJEGH.1995.028.P3.07.
- Dearman, W. R., Money, M. S., Strachan, A. D., Coffey, J. R. & Marsden, A. (1979) 'A regional engineering geological map of the Tyne and Wear County', *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Springer-Verlag, 19(1), pp. 5–17. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02600441>.
- Deere, D. U. (1989) *Rock Quality Designation (RQD) after twenty years*. Gainesville, Florida. doi: 10.1016/B978-0-12-385878-8.00004-5.
- Deere, D. U. & Miller, E. P. (1966) *Engineering classification and index properties for intact rock*. AFNL-TR-65-116. New Mexico.
- Diamantis, K., Gartzos, E. & Migiros, G. (2014) 'Influence of petrographic characteristics on physico-mechanical properties of ultrabasic rocks from central Greece', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(4), pp. 1273–1292. doi: 10.1007/s10064-014-0584-x.
- Dinçer, I., Acar, A., Çobanoğlu, I. & Uras, Y. (2004) 'Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63(2), pp. 141–148. doi: 10.1007/s10064-004-0230-0.
- Entwisle, D. C., Hobbs, P. R., Jones, L. D., Gunn, D. & Raines, M. G. (2005) 'The relationships between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale Volcanic Group core samples from Sellafield', *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(6), pp. 793–809. doi: 10.1007/s10706-004-2143-x.
- Goktan, R. M. & Ayday, C. (1993) 'Technical Note: A suggested improvement to the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 30(3), pp. 321–322.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2004) *Ingeniería geológica*. 2da ed. Edited by I. Cappela. Madrid: Prentice Hall Pearson Educación.
- González de Vallejo, L. I., Hijazo, T. & Ferrer, M. (2008) 'Engineering geological properties of the volcanic rocks and soils of the Canary Islands', *Soils and Rocks*, 31(1), pp. 3–13.
- González de Vallejo, L. I., Hijazo, T., Ferrer, M. & Seisdedos, J. (2007) 'Geomechanical

- characterization of volcanic materials in Tenerife', *International workshop on volcanic Rocks. Proceedings of ISRM Workshop W2, Ponta Delgada, Azores, Portugal, 14-15 July, 2007*, p. pp 20–28. doi: 10.1201/NOE0415451406.ch3.
- Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics, 2nd Edition*. 2nd ed. New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore: John Wiley & Sons. doi: 10.1016/0148-9062(81)90521-0.
- Gupta, A. S. & Seshagiri Rao, K. (1998) 'Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), pp. 161–172. doi: 10.1007/s100640050032.
- Gupta, A. S. & Seshagiri Rao, K. (2000) 'Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state', *Engineering Geology*, 56(3–4), pp. 257–274. doi: 10.1016/S0013-7952(99)00090-3.
- Hernández-Gutiérrez, L. E. (2014) *Caracterización geomecánica de las rocas volcánicas de las Islas Canarias*. Universidad de La laguna. doi: 10.13140/2.1.2526.2884.
- Hernández-Gutiérrez, L. E. & Cerezal, J. C. S. (2015) *Ingeniería geológica en terrenos volcánicos: métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias*. 1^a. Edited by L. E. H. Gutiérrez and J. C. S. Cerezal. Madrid: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002) 'Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition', in *NARMS-TAC Conference*. Toronto, pp. 262–273.
- Hudson, J. A. & Harrison, J. P. (1997) *Engineering rock mechanics - an introduction to the principles*. 1st ed. Kidlington, UK: Elsevier Science Ltd.
- Hunt, E. R. (2005) *Geotechnical engineering investigation handbook*. 2^a. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.
- ISRM (1978a) 'Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15, pp. 89–97.
- ISRM (1978b) 'Suggested methods for determining sound velocity', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15, pp. 53–58. doi: 10.1016/0148-9062(78)91013-6.
- ISRM (1978c) 'Suggested methods for determining tensile strength of rock materials', *International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*, 15, pp. 99–103. doi: 10.1016/0148-9062(78)90003-7.
- ISRM (1978d) 'Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses', *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, pp. 319–368. doi: 10.1016/0148-9062(79)91476-1.
- ISRM (1979a) 'Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), pp. 137–140. doi: 10.1016/0148-9062(79)91450-5.
- ISRM (1979b) 'Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), pp. 143–151. doi:

10.1016/0148-9062(79)91452-9.

- ISRM (1981) 'Basic geotechnical description of rock masses', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, pp. 43–44. doi: 10.1016/0148-9062(81)90994-3.
- ISRM (1985) 'Suggested method for determining point load strength', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, pp. 51–60. doi: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.
- Kocbay, A. & Kilic, R. (2006) 'Engineering geological assessment of the Obruk dam site (Corum, Turkey)', *Engineering Geology*, 87(3–4), pp. 141–148. doi: 10.1016/j.enggeo.2006.04.005.
- Kullberg, J., Rocha, R., A.F., S., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A., Callapez, P., Duarte, L., Kullberg, M., Martins, L., J.R., M., C, A., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., M, M. & Nogueira, C. (2013) 'A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica', in Dias, R. et al. (eds) *Geologia de Portugal*. 1ª. Lisboa: Escolar Editora, pp. 195–347.
- Lourenço, J. C., Brito, J. M., Santos, J., Rosa, S. P. P., Rodrigues, V. C. & Oliva, R. (2010) 'Geotechnical Characterization of Volcanic Rocks and Soils of Madeira Island', *ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. Puerto de la Cruz, Spain: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Mackenzie, W. S., Donaldson, C. H. & Guilford, C. (1982) *Atlas of igneous rocks and their textures*. 1st ed. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited.
- Le Maitre, R. W. (2005) *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the systematics of igneous rocks*. 2ª. Edited by R. W. Le Maitre et al. Cambridge, UK: UK: Cambridge University Press. Available at: <https://books.google.pt/books?id=u2tVu6Sbc4kC>.
- Malheiro, A. M. (2010) 'Contribution to geotechnical characterization of Basaltic pyroclasts', (MacDonald 1972), pp. 53–57.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. (2005) 'The geological strength index: Applications and limitations', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), pp. 55–65. doi: 10.1007/s10064-004-0270-5.
- Matos Alves, C. A., Rodrigues, B., Serralheiro, A. & Faria, A. P. (1980) 'O complexo basáltico de Lisboa', *Comun. Serv. Geol. Portugal*, 66, pp. 111–134.
- Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. (2009) *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511626753.
- Miranda, T., Sousa, L. R., Gomes, A. T., Tinoco, J. & Ferreira, C. (2017) 'Geomechanical characterization of volcanic rocks using empirical systems and data mining techniques', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.11.003.
- Moon, V. & Jayawardane, J. (2004) 'Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand', *Engineering Geology*, 74(1–2), pp. 57–72. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.02.002.

- Muñiz Menéndez, M. & González-Gallego, J. (2010) 'Rock mass classification schemes in volcanic rocks', *3rd ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments, 2010, Puerto de la Cruz, Spain*, pp. 67–72.
- Muñiz Menéndez, M. & González-Gallego, J. (2015) 'Las clasificaciones geomecánicas en macizos rocosos volcánicos', in Hernández-Gutiérrez, L. E. and Santamarta Cereza, J. C. (eds) *Ingeniería geológica en terrenos volcánicos: métodos, técnicas y experiencias en las islas Canarias*. 1ª. Madrid: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, pp. 61–93.
- NP EN 12407 (2008) 'Métodos de ensaio para pedra natural Estudo Petrográfico', *Norma Portuguesa, NP EN*, p. 19.
- Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J. L., Legoinha, P., Machado, S., Morais, M. A., Lourenço, C., Ribeiro, M. L., Henriques, P. & Falé, P. (2006) 'Notícia explicativa da folha 34-D Lisboa', *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000*. Lisboa: Departamento de Geologia, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (Carta geológica de Portugal), p. 74 p. : 1 mapa ; 23 cm.
- Palácios, T. (1985) *Petrologia do Complexo Vulcânico de Lisboa*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Palácios, T. & Matos Alves, C. A. (2003) 'Textos de petrologia ígnea'. Lisboa: Departamento de Geologia, FCUL, p. 142.
- Del Potro, R. & Hürlimann, M. (2008) 'Geotechnical classification and characterisation of materials for stability analyses of large volcanic slopes', *Engineering Geology*, 98(1), pp. 1–17.
- Ramalho, M. M., Rey, J., Zbyszewski, G., Matos Alves, C. A., Palácios, T., Moitinho de Almeida, F., Costa, C. & Kullberg, M. (2001) 'Notícia explicativa da folha 34-C Cascais', *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000*. Lisboa: Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, p. 104.
- Ramalho, M., Pais, J., Rey, J., Berthou, P. Y., Alves, C. A. M., Palácios, T., Leal, N. & Kullberg, M. C. (1993) 'Notícia explicativa da folha 34-A Sintra', *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000, 50000*.
- Ribeiro e Sousa, L. & Moura, F. (2007) 'Road tunnels at Madeira Island, Portugal', *ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. Puerto de la Cruz, Spain: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. 201–206. doi: 10.1201/NOE0415451406.ch26.
- Rocha, M. (1981) *Mecânica das rochas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC.
- Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Gutiérrez, L. E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A. & Eff-Darwich, A. (2009) 'Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Elsevier B.V., 182(1–2), pp. 67–75. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.032.
- Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Gutiérrez, L. E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A., del Potro, R. & Potro, R. (2007) 'The volcanic rocks of the Canary Islands. Geotechnical properties', *ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. Puerto de la Cruz, Spain: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. 53–57.

- Ross, S. M. (2003) 'Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data', *Journal of Engineering Technology*. New Haven, pp. 1–12.
- Schultz, R. A. (1995) 'Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses', *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28(1), pp. 1–15. doi: 10.1007/BF01024770.
- Serralheiro, A. (1978) *Contribuição para a actualização do conhecimento do complexo vulcânico de Lisboa*. Lisboa.
- Sharma, P. K. & Singh, T. N. (2008) 'A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), pp. 17–22. doi: 10.1007/s10064-007-0109-y.
- Silva, J. B. P., Carvalho, C., Caetano, S. D. & Gomes, C. (2010) 'Natural stone from the Azores Archipelago: relationship between lithology and physical-mechanical behaviour', *ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. Puerto de la Cruz, Spain: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, (5).
- Singh, A. & Connolly, M. J. (2003) *VRFSSR - An empirical method for determining volcanic rock excavation safety on construction sites*. Calcuta, India: Institution of Engineers.
- Soares, S. M., Dinis de Gama, C. & Reis e Sousa, M. (2002) 'Geomechanical properties of basalts from the volcanic complex of Lisbon - some interesting correlations', *Workshop on volcanic rocks, ISRM international symposium on rock engineering for mountainous regions, Eurock 2002*, pp. 73–80.
- Sonmez, H. & Ulusay, R. (2002) 'A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies', *Yerbilimleri (Earth Sciences)*, 26, pp. 77–99.
- Sousa, L. M. O., Suárez de Río, L. M., Calleja, L., Ruiz de Argandona, V. G. & Rey, A. R. (2005) 'Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites', *Engineering Geology*, 77, pp. 153–168. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.10.001.
- Szwedzicki, T. (2006) 'Technical Note - A hypothesis on modes of failure of rock samples tested in uniaxial Compression', *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 0(0), pp. 1–7. doi: 10.1007/s00603-006-0096-5.
- Tavallali, A. & Vervoort, A. (2013) 'Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions : Layer orientation and shape effects', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Taibah University, 5(5), pp. 366–377. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.01.004.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1949) *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley.
- Tugrul, A. & Gürpınar, O. (1997) 'A proposed weathering classification for basalts and their engineering properties (Turkey)', *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55, pp. 139–149. doi: 10.1007/BF02635416.
- Tuğrul, A. & Zarif, I. H. (1999) 'Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey', *Engineering Geology*, 51(4), pp. 303–317. doi: 10.1016/S0013-7952(98)00071-4.

- Winter, J. D. (2001) *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. 2nd ed. Edited by P. Lynch. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. Available at: <https://books.google.pt/books?id=5gJyQgAACAAJ>.
- Yoder, H. S. & Tilley, J. C. E. (1962) 'Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems', *Journal of Petrology*, 3(3), pp. 342–532. doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/3.3.342>.
- Yu, C., Ji, S. & Li, Q. (2015) *Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson's ratios of solid materials and rocks*, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. doi: 10.1016/j.jrmge.2015.07.004.
- Yukse, S. & Demirci, A. (2010) 'Geotechnical properties of volcanic materials of the Mount Erciyes', *3rd International Workshop on Volcanic Rock Mechanics*, pp. 99–105.
- Yusof, N. Q. A. M. & Zabidi, H. (2016) 'Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor', *Procedia Chemistry*. Elsevier Ltd., 19, pp. 975–980. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.144.

ANEXOS

A. CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO

CARACTERIZAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES SEGUNDO ISRM (1978D)

Tabela A.1 Descrição do espaçamento segundo a ISRM (1978d)

Descrição	Espaçamento	Designação
Muito afastadas	> 2000 mm	F ₁
Afastadas	600 – 2000 mm	F ₂
Moderadamente próximas	200 – 600 mm	F ₃
Próximas	60 – 200 mm	F ₄
Muito próximas	< 60 mm	F ₅

Tabela A.2 Descrição da persistência/continuidade segundo a ISRM (1978d)

Persistência	Extensão
Muito baixa	< 1 m
Baixa	1 – 3 m
Média	3 – 10 m
Alta	10 – 20 m
Muito alta	> 20 m

Tabela A.3 Descrição da abertura segundo a ISRM (1978d)

Descrição	Abertura
Muito fechada	< 0,1 mm
Fechada	0,1 – 0,25 mm
Parcialmente aberta	0,25 – 0,5 mm
Aberta	0,5 – 2,5 mm
Moderadamente aberta	2,5 – 10 mm
Larga	> 10 mm
Muito larga	1 – 10 cm
Extremamente larga	10 – 100 cm
Cavernosa	> 1 m

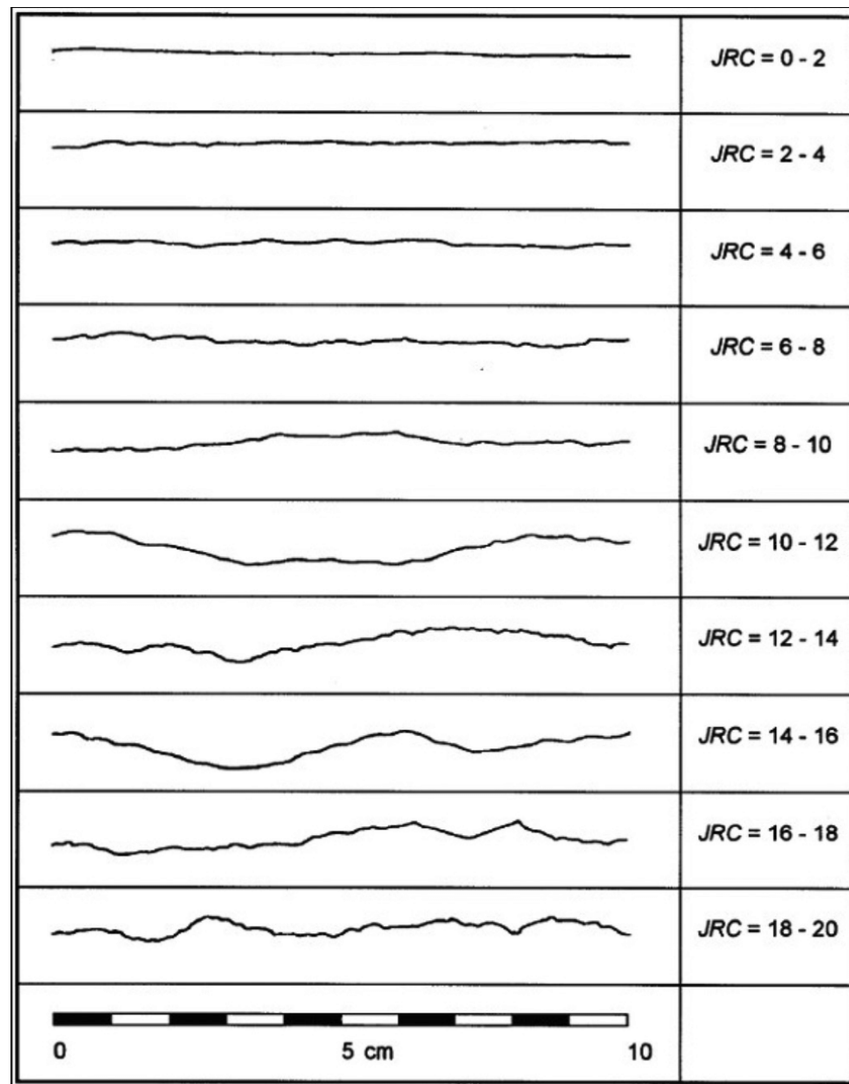


Figura A.1 Diferentes perfis comparativos para determinação da rugosidade e respectivo JRC (Barton & Choubey, 1977)

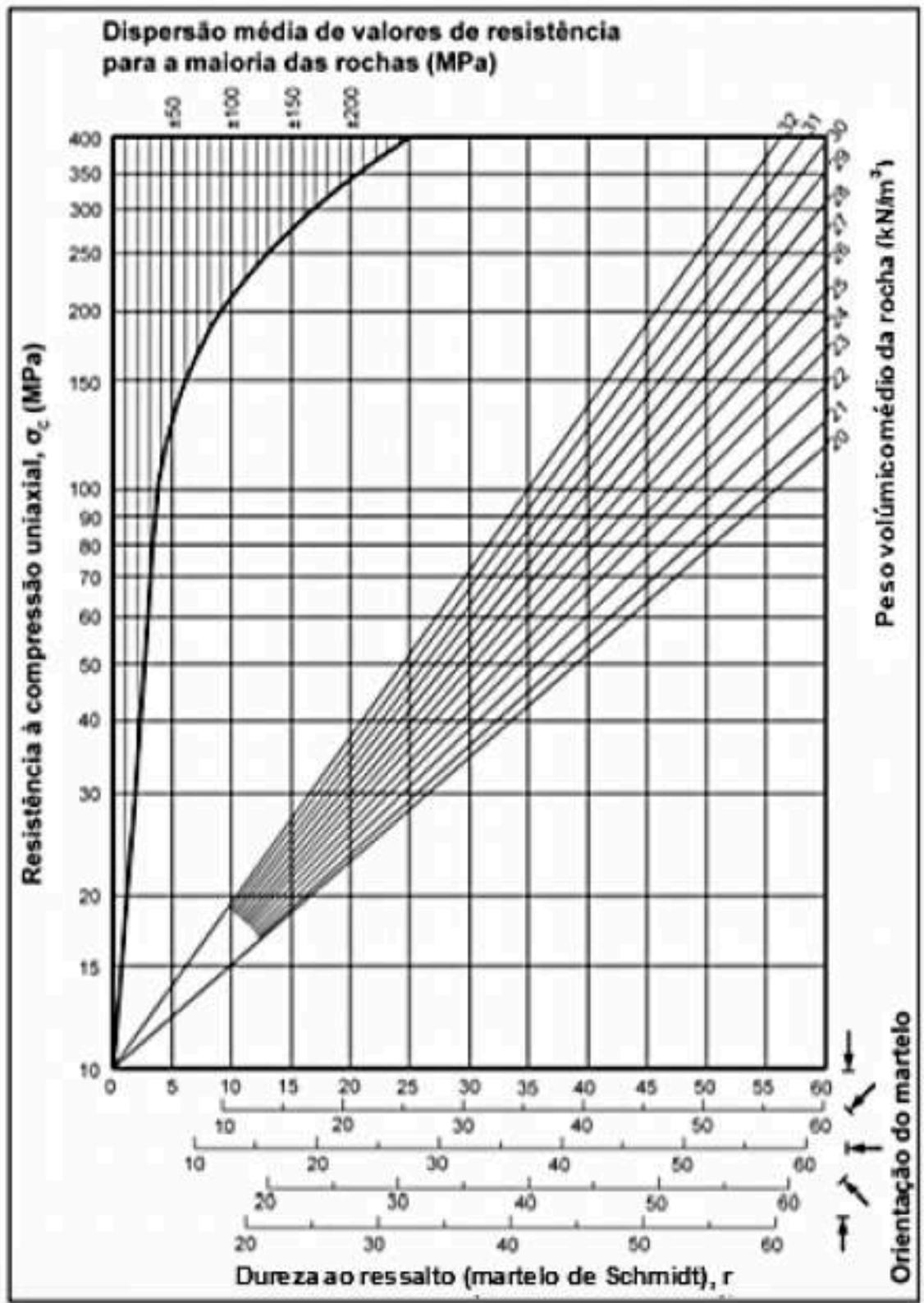


Figura A.2 Ábaco para a estimação da resistência à compressão uniaxial a partir da dureza ao resalto (martelo de Schmidt - tipo L) (Vallejo et al., 2004)

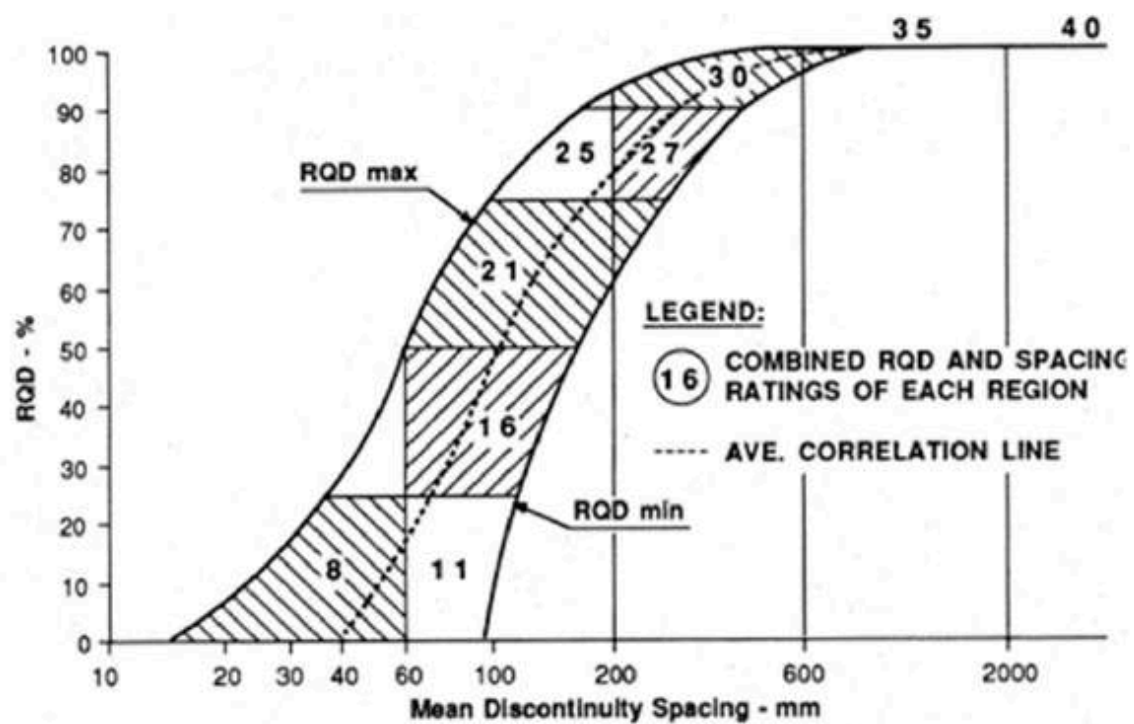


Figura A.3 Ábaco para a estimação do RQD com base no espaçamento entre descontinuidades (Bieniawski, 1989)

Estação n°	Tipo de Plano				
	Direção da Inclinação				
	Inclinação				
Espaçamento(mm)	Extr. Juntas	<20			
	Muito Juntas	20-60			
	Juntas	60-200			
	Moderadamente Juntas	200-600			
	Separadas	600-2000			
	Muito Separadas	2000-6000			
	Extremamente Separadas	>6000			
Continuidade (m)	Muito Baixa	<1			
	Baixa	1 - 3			
	Moderada	3-10			
	Alta	10-20			
	Muito Alta	>20			
Abertura (mm)	Muito Apertada	<0.1			
	Apertada	0.1 - 0.25			
	Parcialmente Aberta	0.25 - 0.5			
	Aberta	0.5 - 2.5			
	Moderadamente Aberta	2.5 - 10			
	Larga	>10			
	Muito Larga	10 - 100			
	Extremamente Larga	100 - 1000			
	>1000				Cavernosa
Rugosidade JRC		0 - 2			
		2 - 4			
		4 - 6			
		6 - 8			
		8 - 10			
		10 - 12			
		12 - 14			
		14 - 16			
		16 - 18			
		18 - 20			
Preenchimento	Composição				
	Espessura (mm)				
	I	São			
	II	Ligeira/ Meteoriz.			
	III	Mediamente Meteoriz.			
	IV	Muito Meteoriz.			
	V	Completamente Meteoriz.			
	VI	Solo Residual			
	Seco				
	Húmido				
	Pinga				
	Flui				
	Percolação				
Resistência	1	Muito Brando			
	2	Branco			
	3	Consistente			
	4	Muito Consistente			
	5	Duro			
	6	Muito Duro			
					Resistência ao Escalômetro de Bolso KG/cm²

Figura A.4 Ficha de campo para caracterização das descontinuidades de maciços rochosos (adaptado de Ferrer, 2007)

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MACIÇOS

RMR (ROCK MASS RATING)

Tabela A.4 Parâmetros para a obtenção do RMR básico (adaptado de Bieniawski, 1989)

Parâmetros			Intervalos de valores						
1	Resistência da rocha intacta	<i>Point load</i> (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Compressão uniaxial		
		RCU (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5- 25	1- 5	<1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (Tabela XX)		Superfícies muito rugosas, sem continuidade, sem separação, paredes não meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação > 1 mm, paredes muito meteorizadas	Superfícies estriadas/ com enchimento < 5 mm de espessura ou separações com 1 – 5 mm contínuas	Enchimento mole com > 5 mm ou separações > 5 mm contínuas		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Perco-l ação de água	Caudal por 10 m de túnel (L/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Pressão de água nas diaclases / tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Totalmente seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluindo		
	Peso		15	10	7	4	0		

Tabela A.5 Classificação da condição das discontinuidades para o cálculo do RMR básico (adaptado de Bieniawski, 1989)

Parâmetro	Intervalo de valores				
Continuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Macia	Lisa
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Enchimento duro		Enchimento mole	
		< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Meteorização da parede	Sem meteorização	Ligeiramente meteorizada	Medianamente meteorizada	Muito meteorizada	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

Tabela A.6 Ajuste dos pesos relativamente à orientação das discontinuidades para o cálculo do RMR (adaptado de Bieniawski, 1989)

Direcção e inclinação das discontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Fundações	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Tabela A.7 Classes do maciço rochoso em função do valor de RMR (adaptado de Bieniawski, 1989)

Valor do RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	> 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha razoável	Rocha fraca	Rocha muito fraca

VRS (VOLCANIC ROCK SYSTEM)

Tabela A.8 Parâmetros e pesos para o cálculo do VRS, com respectivas classes do maciço vulcânico (adaptado de Miranda et al., 2017)

Parâmetros		Intervalos de Valores					
1	RCU (MPa)	> 120	60 - 120	30 - 60	15 - 30	5 - 15	
	Peso	15	9	6	3	1	
2	Grau de alteração	W ₁ e W ₂ Em macroscopia, não tem sinais de alteração nos minerais e difícil de partir com o martelo	W ₃ Minerais com alteração moderada, alteração da cor original e relativamente fácil de partir com o martelo		W ₄ e W ₅ Minerais fortemente alterados, sem brilho e rocha fácil de partir com o martelo de geólogo, com superfície riscável		
	Peso	20	12		4		
3	Frequência das descontinuidades	≤ 1 / m	2 - 4 / m	5 - 10 / m	11 - 15 / m	≥ 16 / m	
	Peso	25	20	15	10	5	
4	Condição das descontinuidades (Tabela)	Superfícies muito rugosas, pouco contínuas, fechadas, paredes não meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação > 1 mm, paredes muito meteorizadas	Superfícies estriadas/ com enchimento < 5 mm de espessura ou separações com 1 – 5 mm contínuas	Enchimento mole com > 5 mm ou separações > 5 mm contínuas	
	Peso	30	25	17	10	0	
5	Presença de água	Seco ou húmido	Gotejando		Fluindo	Fluxo > 0,1 L/min	
	Peso	10	7		4	0	
6	Posição do bloco	Muito favorável à estabilidade	Favorável à estabilidade		Aceitável à estabilidade	Não aceitável à estabilidade	
	Peso	0	– 2		– 5	– 10	
Classificação do maciço rochoso vulcânico							
Valor VRS		100 - 91	90 - 76	75 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
Classe		I	II	III	IV	V	VI
Descrição		Rocha excelente	Rocha boa	Rocha razoável	Rocha regular	Rocha fraca	Rocha muito fraca

VRFSR (VOLCANIC ROCK FACE SAFETY RATING)

Tabela A.9 Parâmetros e pesos para o cálculo do VRFSR, com respectivas classes do maciço vulcânico (adaptado de Singh & Connolly (2003))

Parâmetros para VRMR		Intervalos de valores				
1	RCU	MPa		Peso		
	Resistência muito elevada	> 200		15		
	Resistência elevada	125-200		14		
	Resistência alta	100-124		12		
	Resistência moderada	50-99		7		
	Resistência baixa	25-49		4		
	Resistência muito baixa	1-24		2		
2	Condições da rocha	RQD (%)	Classificação rochosa		Peso	
	Dura e intacta	95-100	Classe I		20	
	Dura, estratificada ou xistenta	90-99	Classe I		20	
	Maciça, moderadamente fracturada	85-94	Classe I		17-20	
	Moderadamente fracturada em blocos e irregular	75-84	Classe I-II		14-16	
	Muito fracturada em blocos e irregular	50-74	Classe II-III		9-13	
	Muito fracturada em blocos e irregular	30-49	Classe III-IV		6-8	
	Friável	3-29	Classe IV-V		4-5	
	Cascalho (grosseiro)	2-	Classe V		3	
	Cascalho (fino)	2-	Classe V		2	
	Areia	0-	Classe V		1	
3	Espaçamento entre descontinuidades	> 2000 mm	600-2000 mm	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Classificação do MR	Sólido	Maciço	Blocos irregulares	Fracturado	Esmagável e friável
	Peso	20	15	10	8	5
4	Condições das descontinuidades					
	a. Continuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	4 - 10 m	11 - 20 m	> 20 m
	Peso	7	4	2	1	0
	b. Separação (abertura)	< 1 mm	1-2 m m	3-4 mm	5-10 mm	11-25 mm
	Peso	7	5	3	2	1
						0

	c. Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Macia	Estriada		
	Peso	7	5	3	1	0		
	d. Enchimento	Nenhum	Enchimento duro		Enchimento mole			
			< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm		
	Peso	7	4	2	2	0		
	e. Meteorização	Sem meteorização	Ligeiramente meteorizada (descolorada)	Medianamente meteorizada (descolorada)	Muito meteorizada (descolorada)	Decomposta		
	Peso	7	5	3	1	0		
5	Perccolação de água (condições gerais)	Seco	Húmido	Encharcado	Gotejando	Fluindo		
	Peso	10	8	6	3	0		
VRFSR								
		Rotura planar (P)		Tombamento (T)				
	F1	(Aj-As)		(Aj-As-180)				
	F2	Bj		Bj				
	F3	Bj-Bs		Bj+Bs				
	As - direcção da inclinação do talude; Aj - direcção da inclinação da descontinuidade; Bs- inclinação do talude; Bj- inclinação da descontinuidade							
Ajustamentos								
	F1		F2		F3	T	P	
	0,15	> 30	0,15	< 20	0	< 110	> 10	
	0,4	20-30	0,4	20-30	-6	110-120	10-0	
	0,7	19-10	0,7	31-35	-25	> 120	0	
	0,85	9,5	0,85	36-45	-50		0 a -10	
	1,0	< 5	1,0	> 45 ou T	-60		< -10	
	F4 (método de escavação)		F5 (ajuste da altura)		F6 (ajuste no pendor)			
			0	1,5-6 m	-1	1-1,5 m		
	15	Talude natural	-1	6-12 m	-4	1,5-2,5 m		
	10	Pré-corte	-2	12-18 m	-6	2,5-3 m		
	8	Smooth blasting	-3	18-24 m	-10	> 3 m		
	0	Detonações adequadas ou desmonte mecânico	-4	24-30,5 m				
	-8	Detonações inadequadas	-5	30,5-36,5 m				
			-6	36,5- 43 m				
VRFSR = VRMR + (F1) (F2) (F3) + F4 + F5 + F6								
Classificação do maciço rochoso vulcânico								
	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21	20 - 0
	I		II		III		IV	V
	Rocha excelente		Rocha boa		Rocha razoável		Rocha regular	Rocha fraca
	Totalmente estável		Estável		Potencial-mente estável		Instável	Totalmente instável
	-		ocasional (redes metálicas)		medidas parciais de protecção (redes metálicas + suporte)		medidas de protecção	medidas de protecção intensivas (reperfilamento)
	-		alguns blocos		algumas descontinuidades e cunhas		Rotura em cunha ou planar	Rotura planar extensa

GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)







<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60	50	40
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	60	50	40	30
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	50	40	30	20
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40	30	20	10
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A	10		

Figura A.5 Ábaco geral para estimação do GSI a partir de observações geológicas (Marinos, Marinos & Hoek, 2005)

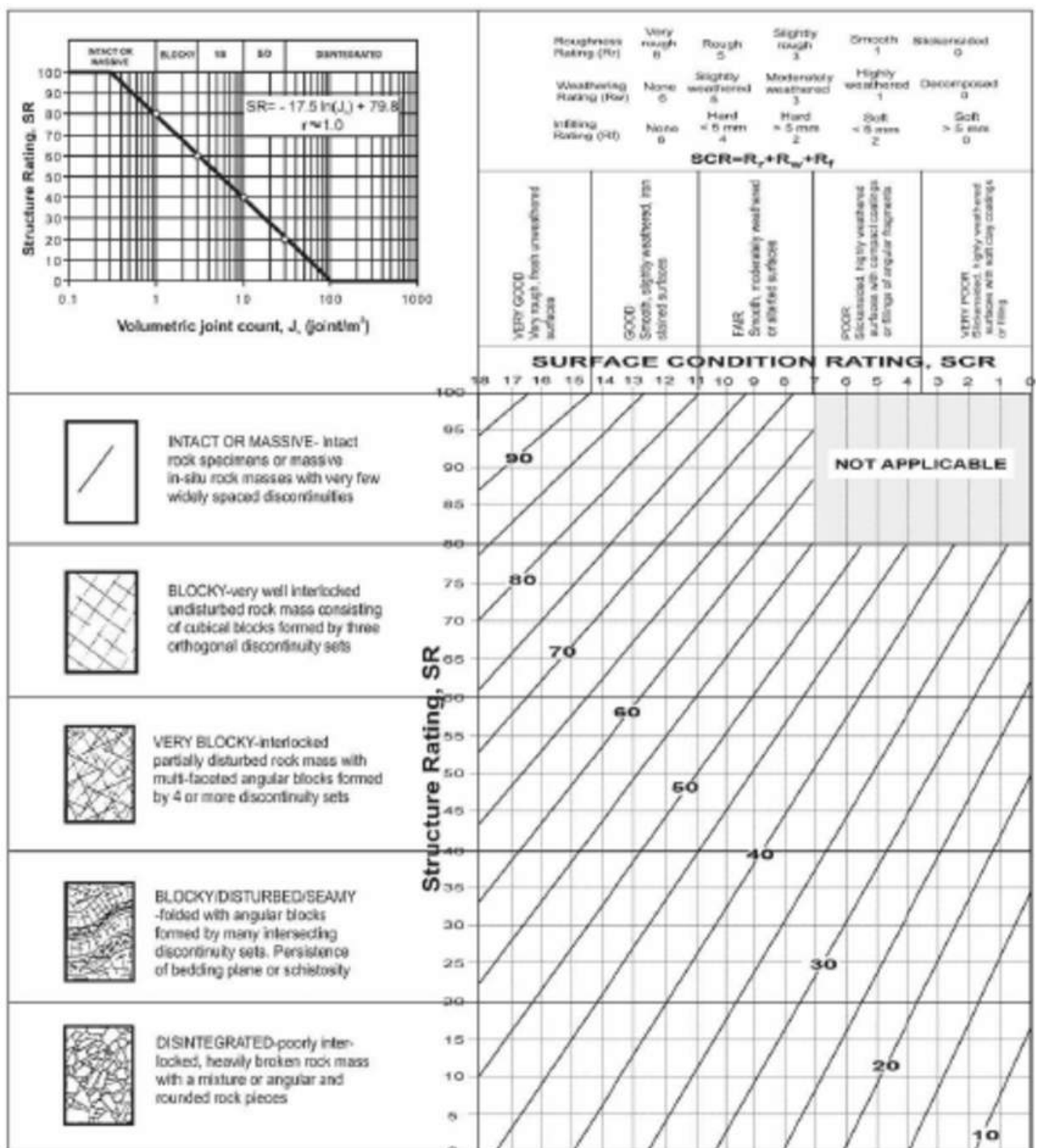


Figura A.6 Ábaco para estimação do GSI modificado a partir de observações geológicas (Sonmez & Ulusay, 2002)

B. DESCRIÇÃO DE AMOSTRA DE MÃO E MICROSCÓPICA

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)			
	Amostra n.º	Localização	Origem
Identificação			
Descrição da amostra de mão			
Cor/Intervalo de cor			
Textura	grau de cristalinidade		
	granularidade		
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos		
	Máficos		
	Fracturas	Porosidade	Cavidades
Abertas			
Fechadas			
Preenchidas			
Meteorização/ alteração			
Presença de fósseis			
Presença de xenólitos			
Descrição microscópica			
Textura	grau de cristalinidade		
	granularidade		
	formas e arranjos geométricos		
	texturas especiais		
Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos
	Secundária		
	fenocristais		
	microfenocristais		
	matriz		

Quantificação	volume (%)*	Primários	Secundários	Total
	*determinação semi-quantitativa			
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades			
	Fracturas			
Grau de alteração				
Notas				
Classificação				
Informação complementar				
Tipo ()		Plutónica P	QAPF	
		Hipabissal H		
		Vulcânica V		

C. ENSAIO DE DUREZA AO RESSALTO

Tabela C.1 Tabela parcial para aplicação do critério de Chauvenet (<http://www.statisticshowto.com/chauvenets-criterion/>)

n (dimensão da população)	t ou <i>p-value</i>
(...)	(...)
10	1,96
11	2,00
12	2,04
13	2,07
14	2,10
15	2,13
16	2,15
17	2,18
18	2,20
19	2,22
20	2,24
21	2,26
22	2,28
(...)	(...)

Tabela C.2 Tabela parcial para aplicação do critério de Peirce (Ross, 2003)

n (dimensão da população)	Número de observações duvidosas			(...)
	1	2	3	
(...)	(...)			
10	1,878	1,453	1,261	
11	1,925	1,619	1,430	
12	1,969	1,663	1,475	
13	2,007	1,704	1,516	
14	2,043	1,741	1,554	
15	2,076	1,775	1,589	
16	2,106	1,807	1,622	
17	2,134	1,836	1,652	
18	2,161	1,864	1,680	
19	2,185	1,890	1,707	
20	2,209	1,914	1,732	
21	2,230	1,938	1,756	
22	2,251	1,960	1,779	
(...)	(...)			

APÊNDICES

A. DESCRIÇÃO DOS PROVETES PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS

A. Textura

- A1. Rocha holocristalina e afanítica porfirítica
- A2. Rocha holocristalina e afanítica
- A3. Rocha hialocristalina, afanítica e de textura amigdalóide (cavidades com calcite e zeólitos)
- A4. Rocha hialocristalina, afanítica e de textura anastomosada (presença de veios com calcite e zeólitos que individualizam núcleos rochosos basálticos)
- A5. Rocha hialocristalina, afanítica e de textura amigdalóide e anastomosada (a proporção amígdalas e de veios é similar)

B. Cor

- B1. Melanocrata com cor cinzenta
- B2. Melanocrata com cor cinzenta a acastanhada
- B3. Melanocrata com cor acastanhada a avermelhada, conteúdo laivos de cor clara devido aos veios e amígdalas

C. Estado de alteração

- C1. Ausências de sinais de alteração ou oxidação (W_1)
- C2. Ausência de alteração na matriz rochosa, mas existente nas fissuras e em seu redor onde ocorre uma descoloração da rocha (W_{1-2})
- C3. Matriz rochosa alterada, apresentando descoloração e/ou oxidação, mas rocha não se desagrega (W_2)
- C4. Alteração e/ou oxidação da matriz rochosa, sendo que parte do material se mostra desagregável (e com mais porosidade) (W_3)
- C5. Muito a extremamente alterado, tendo cor castanha avermelhada e por mais de metade da rocha se desagregar (W_4)
- C6. Características de C5 juntamente com um padrão descontínuo onde ocorrem núcleos rochosos entre 20 a 50 % (W_4)

D. Fracturação

- D1. Ausência de fracturação
- D2. Presença de fissura fechada que atravessa o provete
- D3. Presença de fissura fechada em cunha
- D4. Presença de mais do que uma fissura fechada no provete com orientação variável
- D5. Presença de veio branco de preenchimento calcítico e com zeólitos que atravessa o provete
- D6. Presença de veio com zeólito e calcite em cunha
- D7. Presença de mais do que um veio calcítico (com zeólito), com orientações variadas ao longo do provete (F_{3-4} a F_4)
- D8. Presença de mais do que um veio calcítico (com zeólito), com orientações variadas ao longo do provete (F_{4-5})
- D9. Presença de múltiplos veios calcíticos e com zeólitos que isolam núcleos rochosos (por norma mais alterados)
- D10. Presença de superfície de fractura em cunha junto à face do provete
- D11. Porosidade
- D12. Pequenas cavidades, vazias ^(v) ou preenchidas ^(c) com calcite e zeólitos
- D13. Amígdalas preenchidas com calcite e zeólitos
- D14. Geódes com calcite e zeólito

E. Notas

- E1. Presença de ligeiras rugosidades em todo o provete resultantes do processo de carotagem
- E2. Presença de ligeiras irregularidades no bordo das faces devido ao processo de corte na serra
- E3. Presença de núcleos cristalinos com maior oxidação
- E4. Provete prismático irregular (ultrassons e RCP)
- E5. Provete cilíndrico (ultrassons e RCP)

Figura A.1 Chave de caracterização macroscópica das rochas basálticas utilizadas em cada ensaio

A.1 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

Tabela A.1 Caracterização dos provetes de BA para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons (não são usados no RCU)

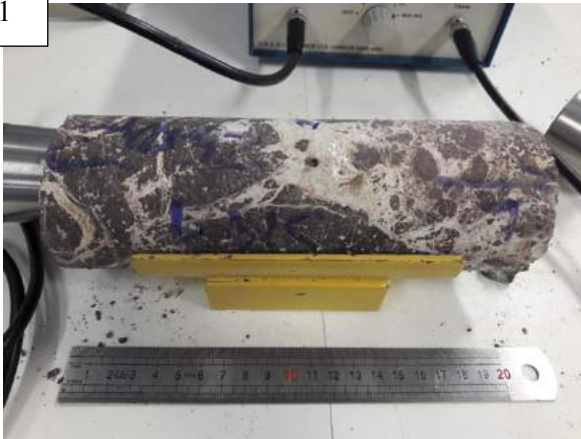
Amostra: BA				Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira digital com incerteza ± 0,01 mm			Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W			
Provete		D (mm)				D _{médio} (mm)	D _{médio} do grão (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete (Figura A.2.2)
Bloco	nº.											
S14 (da localização de BLV)	1*	71,13		71,20	71,09	71,14	6,14	217,0	216,3	217,1	216,8	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E6
	2*	71,09		71,14	71,11	71,11	8,30	222,0	223,0	222,0	222,3	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E6
Bloco	nº.	D	D _{médio}	W ₁	W ₂	W	D _{médio} do grão (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
2	3	53,50	-	60,33	61,21	60,77	6,47	159,3	159,1	160,1	159,5	A3, B3, C5, D4, D9 (finos), D13, E5
4	4* ²	99,76	108,40	99,77	99,43	107,33	7,84	232,5	230,3	231,4	231,4	A5, B3, C6, D4, D9, D13, D14, E5
		117,03		112,18	117,92							
9	5* ²	68,90	70,19	63,48	65,73	67,86	3,03	208,5	208,6	209,1	208,7	A5, B3, C6, D4, D9, D13, E5
		70,19		81,01	61,23							
9	6* ²	87,22	84,54	111,28	102,46	99,78	5,19	215,6	215,2	217,0	215,9	A5, B3, C6, D4, D9, D13, E5
		81,85		104,95	80,41							

Nº. total de provetes: 6

* provetes que advêm da localização da amostra BLV, ocorrendo a profundidades inferiores. Foram testados por serem da mesma litologia e por se apresentarem apropriados para a realização do ensaio

*² provetes irregulares, logo fez-se duas medições de D, W1 e W2 para cada face. A média resulta de todos os valores
Dada a litologia, todos os provetes apresentam fracturas abertas que terão influência nos resultados

1



2



3



4



5



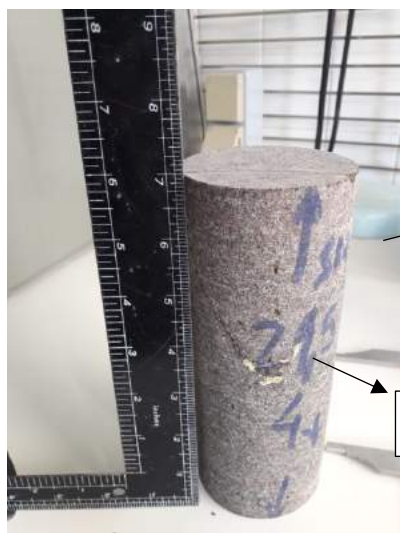
6



A.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Tabela A.2 Caracterização dos provetes de BLV para o ensaio de RCU e imagens dos mesmos representativas

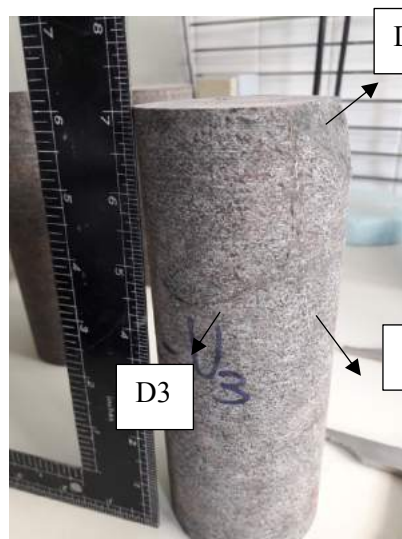
Amostra: BLV		Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira analógica com incerteza $\pm 0,025$ mm			Localização: 38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W			
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Grupo	n°.									
I	1	71,30	71,35	71,45	71,4	175,80	176,10	176,55	176	A1, B1, C2, D2, D3*, D11
	3	71,75	71,70	71,93	71,8	179,15	179,00	179,30	179	A1, B1, C2, D3, D5, D10
	4	71,85	71,65	71,90	71,8	181,40	180,40	181,30	181	A1, B1, C2, D3, D6
	5	71,80	71,75	71,75	71,8	180,90	179,80	179,40	180	A1, B1, C2, D6
	6	71,68	71,70	71,80	71,7	180,45	180,40	180,70	181	A1, B1, C2, D5, D10
	7	71,95	71,90	71,80	71,9	181,30	179,60	180,70	181	A1, B1, C2, D6 (x3)
Nº. total de provetes: 6										
* fractura com preenchimento descontínuo de calcite										
II.a	1	71,15	71,10	70,95	71,1	175,55	176,00	177,30	176	A1, B1, C3, D4, D6 (x2), D8, D10, D12 ^(c)
	3	70,70	70,80	70,70	70,7	177,15	176,80	176,20	177	A1, B1, C3, D6, D8, D11
	4	70,90	71,00	70,90	70,9	177,70	178,30	178,20	178	A1, B1, C3, D6, D8
II.b	1	71,50	71,45	71,50	71,5	169,15	169,60	169,10	169	A1, B2, C3, D8, D12 ^(c)
	2	71,40	71,50	71,45	71,5	178,70	179,10	179,20	179	A1, B1, C4, D8
	3	71,80	71,70	71,60	71,7	176,80	175,50	175,30	176	A1, B1, C4, D8, D10
Nº. total de provetes: 6										



D3



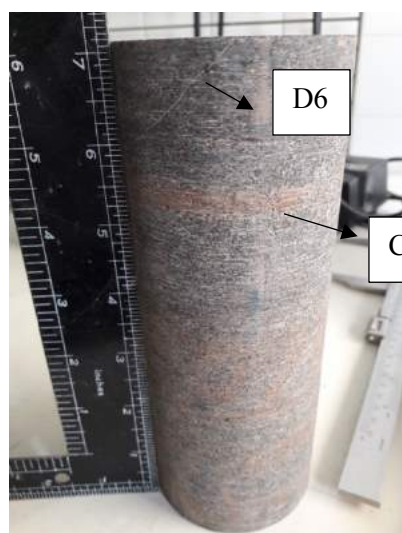
A1, B1, D11



D10

D3

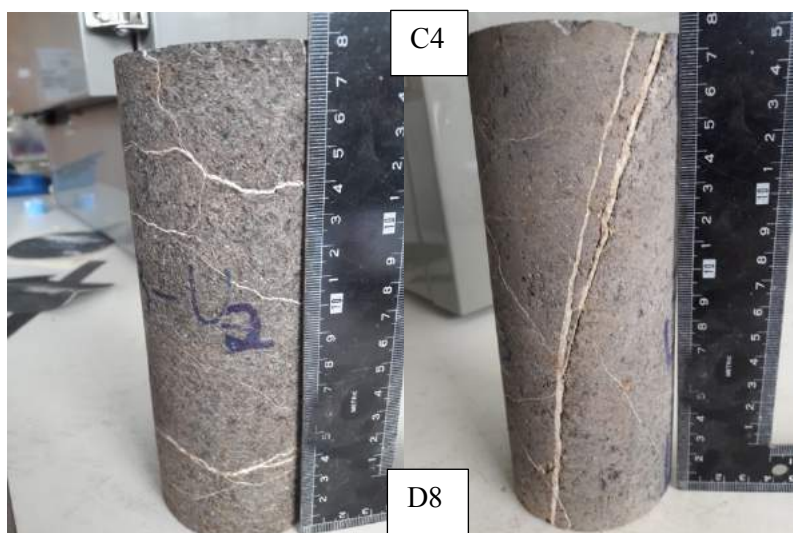
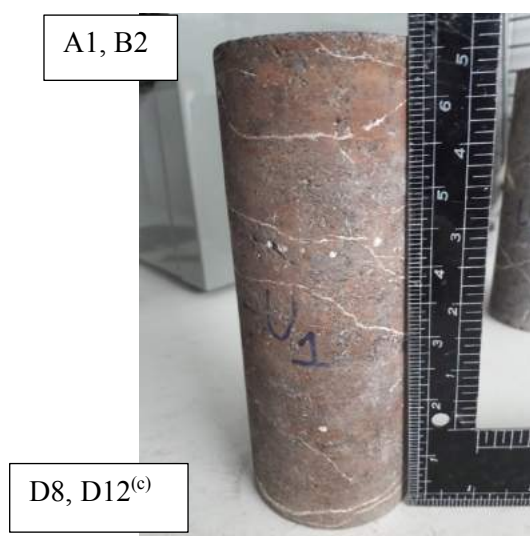
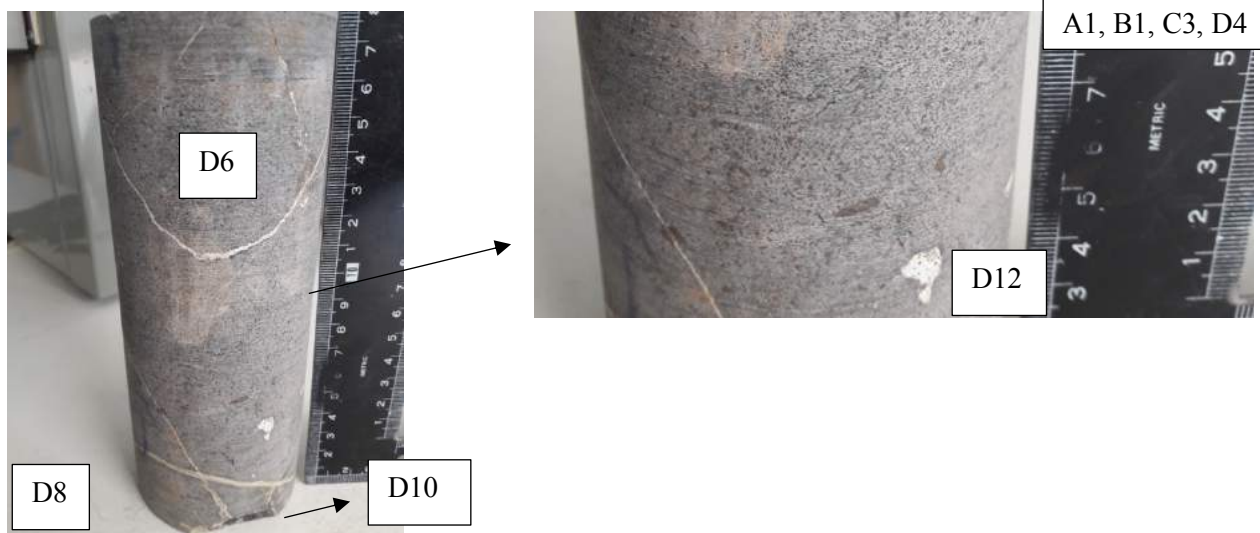
D5



D6

C2

GRUPO I



GRUPO II

A2, B1, C3, D4, D7



D12^(v)

D6

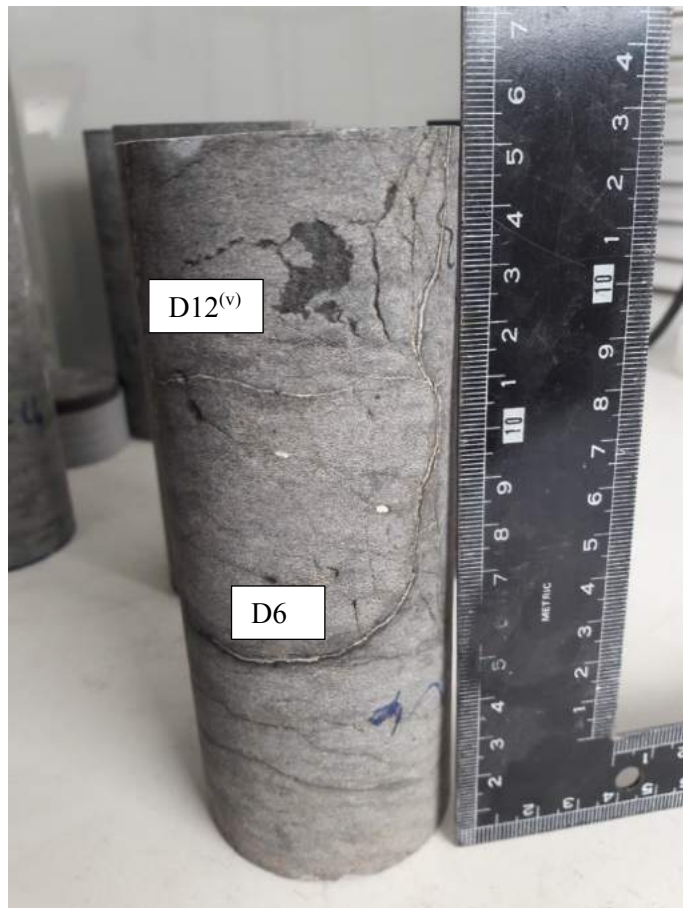
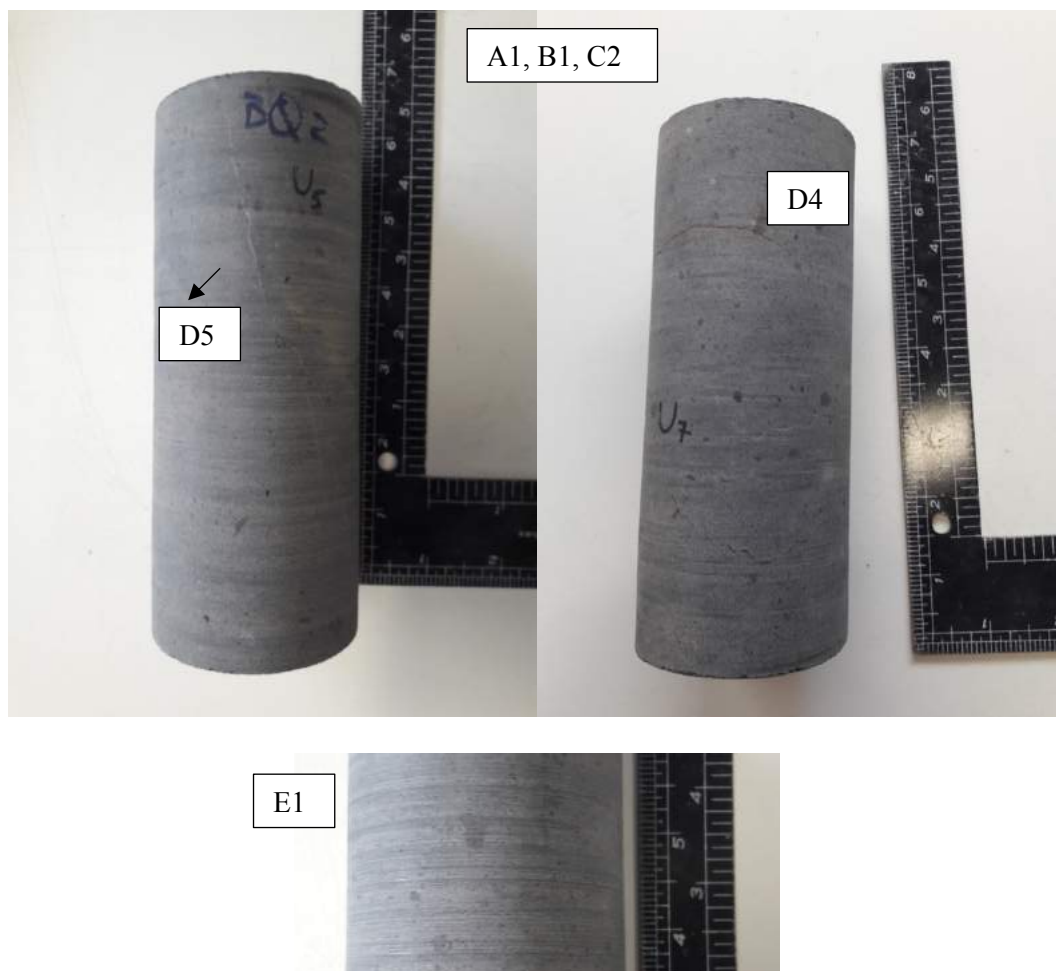


Tabela A.4 Caracterização dos provetes de BQ para o ensaio de RCU e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BQ		Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm		Localização: 38°42'43"N e 9°15'54,29"W				
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Bloco	nº.									
1	2	60,10	60,07	60,05	60,1	149,85	149,41	149,30	150	A1, B1, C2, D5 (horizontal), E1
2	4	59,95	60,05	60,00	60,0	146,88	147,03	147,22	147	A1, B1, C2, D5 (x2), D6, E1
	5	60,15	60,02	60,07	60,1	148,71	148,39	148,11	148	A1, B1, C2, D5, E1, E2
3	6	60,10	60,04	60,14	60,1	148,11	148,54	148,49	148	A1, B1, C2, D5, E1
5	7	59,99	59,99	60,00	60,0	145,39	145,03	145,92	145	A1, B1, C2, D4, E1
	8	60,23	59,94	60,15	60,1	148,91	149,46	148,89	149	A1, B1, C2, D4, E1
Nº. total de provetes: 6										



A.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PONTUAL

Tabela A.5 Caracterização dos provetes de BLV para o ensaio de RCP e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BLV		Origem: CVL	Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm	Localização: 38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W
Advêm de diversos furos de sondagem; Todas as espécies foram sujeitas a corte de serra e secaram no laboratório durante pelo menos 2 semanas; Ensaio em laboratório				
Proвете		W (mm)	D (mm)	Descrição do provete
Grupo	n°.			
I	1	71,60	36,00	A1, B1, C2, D2*, E6
	2	71,20	36,36	A1, B1, C2, D7, D11, E6
	3	71,24	33,00	A1, B1, C2, D7, D10, D12 ^(c) , E2, E6
	4	71,48	35,56	A1, B1, C2, D5, E2, E6
	5	71,66	34,62	A1, B1, C2, D6, D10* ² , E2, E6
	6	71,55	34,73	A1, B1, C2, D6, D10, E6
	7	71,63	31,63	A1, B1, C2, D5, E2, E6
	10	71,70	34,82	A1, B1, C2, D5 (horizontal), E2, E6
	12	71,63	34,76	A1, B1, C2, D6, D10, E2, E6
	13	71,52	36,67	A1, B1, C2, D5, D10, E2, E6
	14	71,46	34,19	A1, B1, C2, D2, D5, E2(espess.irregular), E6
	15	71,31	34,46	A1, B1, C2, D9, D11, D12 ^(v) , E6
	16	71,38	34,37	A1, B1, C2, D5, D10, D11, E2, E6
	17	71,57	37,59	A1, B1, C2, D2, D5, D10, D12, E2, E6
	18	71,46	34,24	A1, B1, C2, D3, E2, E6
	19	71,70	36,89	A1, B1, C2, D2, E6
N°. total de provetes: 17; * semi-preenchida por calcite; * ² fractura lateral				

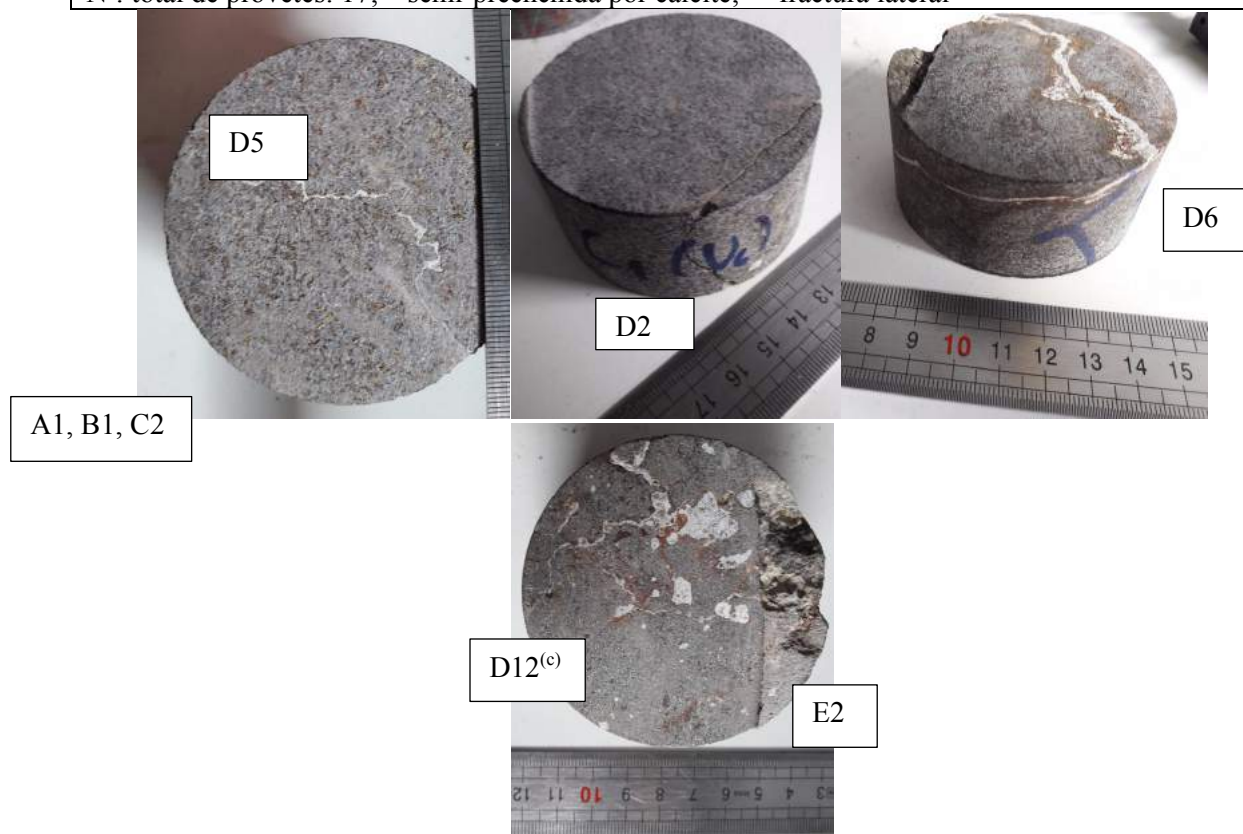
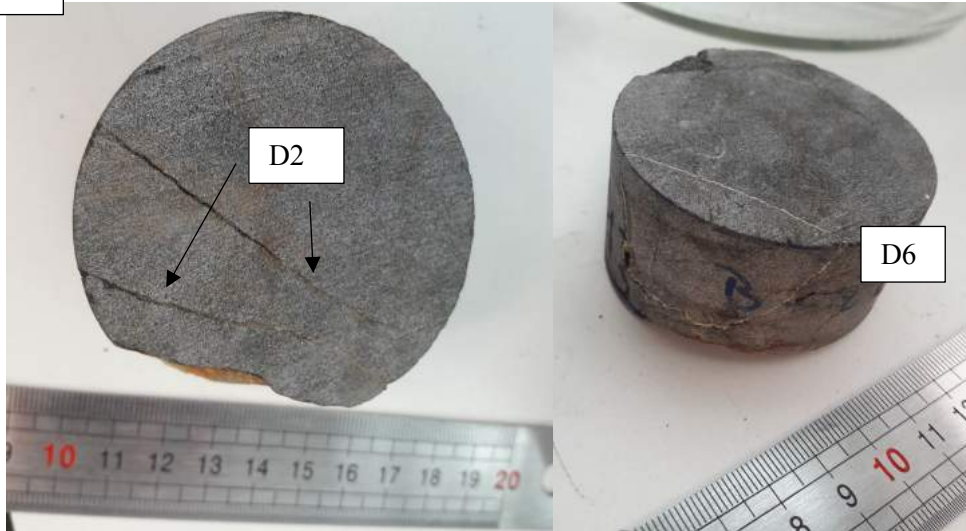


Tabela A.6 Caracterização dos provetes de BLA para o ensaio de RCP e imagens dos mesmos representativas

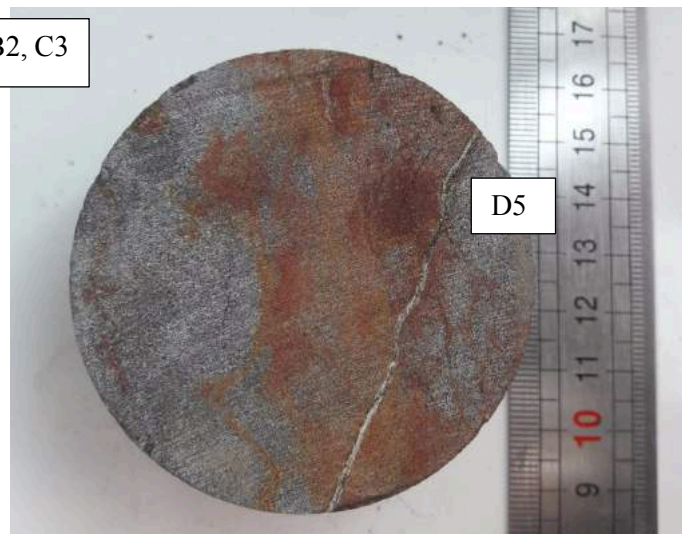
Amostra: BLA		Origem: CVL	Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm	Localização: 38°45'33,45"N e 9°13'15,95"W
Advêm de uma sondagem. Todas as espécies foram sujeitas a corte de serra e secaram no laboratório durante pelo menos 2 semanas; Ensaio em laboratório				
Provete		W (mm)	D (mm)	Descrição o provete
Grupo	nº.			
I	1	61,24	30,20	A2, B1, C2, D4, E6
	2	61,15	28,75	A2, B1, C3, D5, E2, E6
	3	61,18	30,36	A2, B1, C3, D5, D10, E2, E6
	4	61,08	34,63	A2, B1, C3, D2 (x2), D10, E6
	5	61,13	26,20	A2, B1, C2, D4, E6
	6	61,24	30,96	A2, B1, C2, D4, E6
	8	61,20	32,74	A2, B1, C2, D4, D5, E6
	9	61,18	30,11	A2, B1, C3, D4, D6, E6
	10	61,13	28,60	A2, B1, C3, D4, D5, E6
	12	61,02	33,35	A2, B1, C3, D4, D5, D10, E6
	13	61,08	30,96	A2, B1/B2, C3, D4, D5, D6, D10, E6
	14	61,28	31,28	A2, B1/B2, C3, D4, D5, D10, E2, E6
	16	61,34	33,15	A2, B1, C2, D4, D6 (x2) (espess.irregular) , E6
	18	61,20	30,19	A2, B1/B2, C3, D4, D6, D10, E2, E6
	19	61,12	31,71	A2, B1/B2, C3, F4, D6, D10, E6
	20	61,07	33,99	A2, B1, C3, D4, D5, D10, E2, E6
	21	61,09	31,28	A2, B1, C3, D4, D10, E6
	22	61,15	33,32	A2, B1, C3, D4, D5, E6
	25	61,07	26,00	A2, B1 C3, D4, D5, D10, E6
	26	61,01	29,21	A2, B1/B2, C3, D4, D5, D12 ^(v) , E6
	27	61,09	31,26	A2, B1, C2, D4, D5, E2, E6
	28	61,08	30,92	A2, B1/B2, C3, D4, D5, D6, D10, E6
Nº. total de provetes: 20				
B1/B2 – rocha melanocrata, com cor cinzenta escura e laivos acastanhados/avermelhados				
II	1	71,12	32,66	A2, B2, C3/C4, D4, D7, D10, D11, E6
	2	71,11	31,72	A2, B2, C3/C4, D7, D12 ^(c) , E6
	3	70,51	33,63	A2, B2, C3, D3, D4, E6
	4	70,39	38,91	A2, B2, C3/C4, D6, D7, E3, E6
	5	71,05	38,09	A2, B2, C3/C4, D4, D7, D12 ^(c) , E2, E3, E6
	6	70,92	32,50	A2, B2, C3/C4, D6, D7, D10, D12 ^(c) , E2, E3, E6
	7	70,95	33,51	A2, B1/B2, C3/C4, D4, D6, D7, D10, E2, E6
	8	70,69	32,66	A2, B2, C3, D7, D9, D11, E2, E3, E6
	11	70,85	26,53	A2, B2, C3/C4, D6, D7, D10, D12 ^(c) , E2, E3, E6
	12	61,30	31,12	A2, B2, C3/C4, D7, D10, D12 ^(c) , D12 ^(v) , E6
Nº. total de provetes: 10				
B1/B2 – rocha melanocrata, com cor cinzenta escura e laivos acastanhados/avermelhados				

GRUPO I

A2, B1, C3



A2, B1/B2, C3



GRUPO II

A2, B2, C3/C4, E3

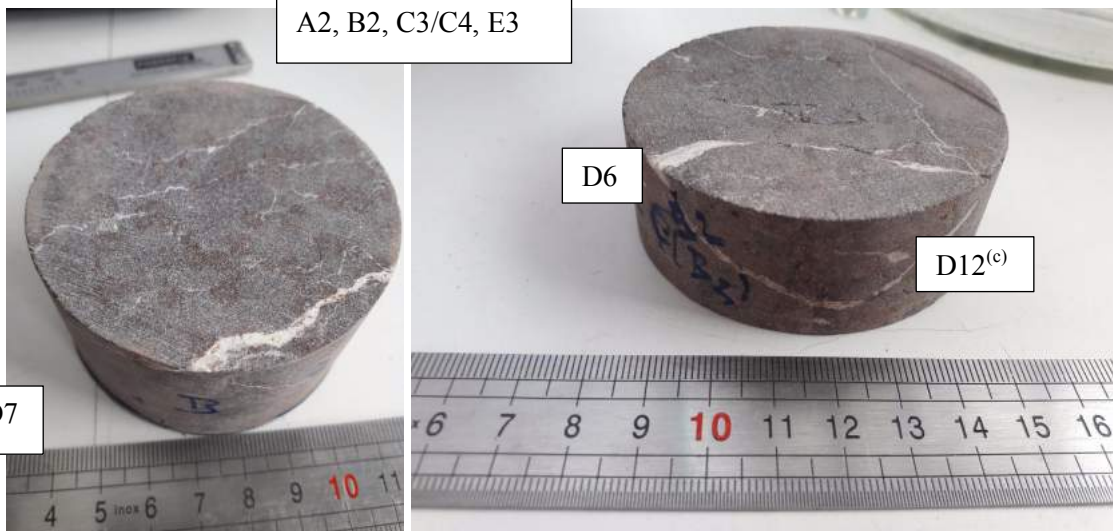


Tabela A.7 Caracterização dos provetes de BQ para o ensaio de RCP e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BQ		Origem: CVL	Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm	Localização: 38°42'43"N e 9°15'54,29"W
Advêm de 5 blocos de basalto recolhidos à superfície perto de um afloramento. Todas as espécies foram sujeitas a corte de serra e secaram no laboratório durante pelo menos 2 semanas; Ensaio em laboratório				
Provete		W (mm)	D (mm)	Descrição do provete
Bloco	nº.			
1	1	60,05	28,52	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	2	60,09	27,23	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	3	60,19	29,19	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	4	60,11	27,91	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	5	60,06	29,10	A1, B1, C2, D2, E1, E2, E6
	6	60,12	27,82	A1, B1, C2, D2, E1, E2, E6
	7	60,08	29,14	A1, B1, C2, D5, E1, E2, E6
	8	60,21	29,43	A1, B1, C2, D3, D10, E1, E2, E6
2	9	60,09	28,17	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
3	10	60,11	28,11	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	11	60,11	29,57	A1, B1, C2, D2, E1, E2, E6
	12	60,20	26,93	A1, B1, C2, D3, E1, E2, E6
4	14	60,22	29,93	A1, B1, C2, D3 (x2), D10, E1, E2, E6
	15	60,03	28,14	A1, B1, C2, D2, E1, E2, E6
5	16	60,14	28,78	A1, B1, C2, D5, E1, E2, E6
	17	60,11	30,96	A1, B1, C2, D3, E1, E2, E6
	18	60,18	25,48	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	19	60,13	30,66	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
	20	60,18	29,33	A1, B1, C1, D1, E1, E2, E6
Nº. total de provetes: 19				

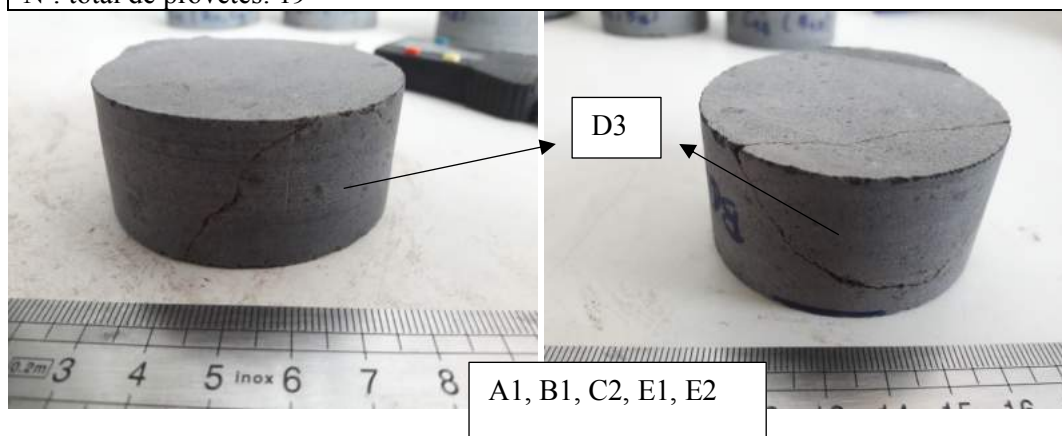


Tabela A.8 Caracterização dos provetes de BM para o ensaio de RCP e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BM		Origem: CVL	Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm	Localização: 38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W
Advêm de 4 blocos de basalto recolhidos à superfície perto de um afloramento. Todas as espécies foram sujeitas a corte de serra e secaram no laboratório durante pelo menos 2 semanas; Ensaio em laboratório				
Provete		W (mm)	D (mm)	Descrição do provete
Bloco	nº.			
1	1	60,11	30,64	A1, B1, C2, D3, E1, E2, E6
	2	60,18	27,04	A1, B1, C1, D1, E1 (espess irregular), E6
2	3	60,41	26,56	A1, B1, C1, D2, E1, E6
	4	60,23	30,68	A1, B1, D1, E6
	5	60,16	30,86	A1, B1, C2, D3, E1 (espess irregular), E6
	6	60,34	25,25	A1, B1, C2, D3, D5, E1, E6
	7	60,24	27,30	A1, B1, C2, D6, E6
	8	60,24	29,19	A1, B1, C2, D6, E1, E2 (espessura irregular), E6
	9	60,38	25,02	A1, B1, C2, D2, E1, E2, E6
4	10	59,97	27,03	A1, B1, C1, D6, E1, E6
	11	60,17	29,20	A1, B1, C2, D2, E1, E6
Nº. total de provetes: 11				

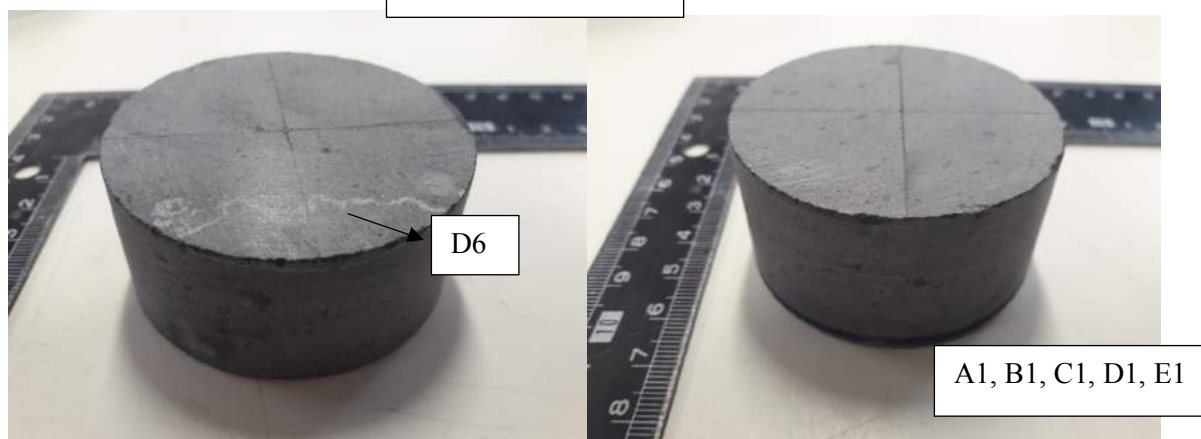
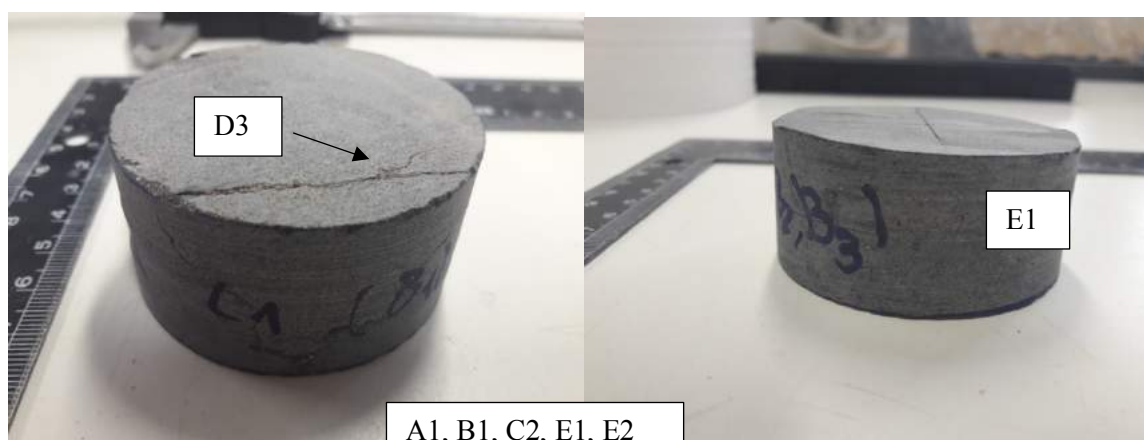


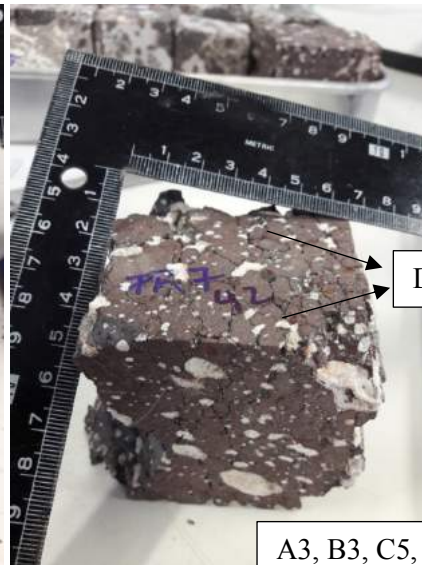
Tabela A.9 Caracterização dos provetes de BA para o ensaio de RCP e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BA				Origem: CVL			Instrumento de medição: craveira digital com incerteza ± 0,01 mm		Localização: : 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	
Advêm de 7 blocos de rocha basáltica muito alterada obtidos na sequência da escavação de uma obra. Todas as espécies foram sujeitas a corte de serra e secaram no laboratório durante pelo menos 2 semanas; Ensaio em laboratório										
Provete		D (mm)			D _{médio}	W1 (mm)	W2 (mm)	W (mm)	Descrição do provete (Figura A.2.2)	
Bloco	nº.									
1	1	57,57	58,21	56,97	57,58	59,36	59,31	59,34	A5, B3, C5, D4, D9, D13. E5	
	2	66,13	66,87	69,79	67,60	65,28	61,88	63,58	A5, B3, C5, D4, D9, D13, D14, E5	
	3	59,86	54,85	54,98	56,56	58,83	54,05	56,44	A5, B3, C6, D4, D9, D13, E5	
2	4	47,74	49,40	47,47	48,20	57,02	61,90	59,46	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	5	54,62	54,65	54,04	54,44	57,31	57,23	57,27	A3, B3, C5, D4, D9, D13, E5	
	6 *	60,53	61,22	61,26	61,00	48,21	57,26	52,74	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	7	59,91	60,18	59,61	59,90	68,37	68,86	68,62	A3, B3, C5, D4, D9 (pequenos), D13,E5	
	8	46,52	47,27	46,60	46,80	64,76	64,45	64,61	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	9	53,26	53,17	53,06	53,16	54,88	54,39	54,64	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	10	62,75	62,37	62,78	62,63	58,75	62,49	60,62	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	11	52,86	52,88	53,99	53,24	62,37	60,75	61,56	A3, B3, C5, D4, D13, E5	
	12	52,97	53,13	53,27	53,12	62,98	63,43	63,21	A3, B3, C5, D9 (muito finas), D13, E5	
13	53,18	52,65	53,67	53,17	63,00	57,38	60,19	A3, B3, C5, D4, D9 (muito finas), D13, E5		
3	14	53,20	52,27	52,02	52,50	67,49	67,23	67,36	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5	
	15	50,79	50,75	50,73	50,76	59,26	55,32	57,29	A4, B3, C6. D4, D9, D13, E5	
	16	49,16	49,44	50,27	49,62	65,62	65,85	65,74	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5	
	17	58,35	58,17	58,44	58,32	48,09	62,83	55,46	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5	
	18	46,41	47,70	46,48	46,86	55,08	54,69	54,89	A4, B3, C6, D4, D9, E5	
	19	56,25	56,67	56,61	56,51	64,79	57,76	61,28	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5	

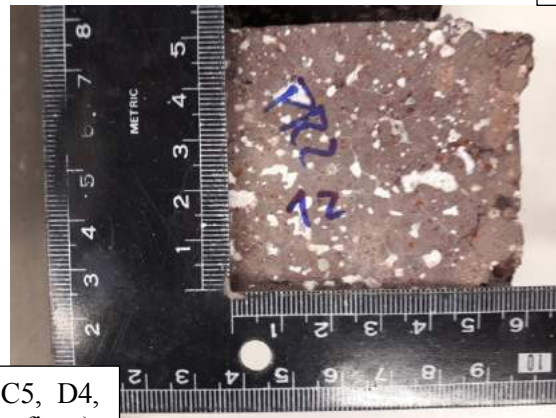
	20*	67,30	68,36	67,54	67,73	53,63	54,77	54,20	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	21	58,28	58,26	58,38	58,31	62,11	67,34	64,73	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	22	59,35	59,28	60,58	59,74	64,74	61,66	63,20	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
4	23	59,01	57,61	56,73	57,78	79,91	85,25	82,58	A5, B3, C5, D4, D9, D13, E5
	24	66,74	67,85	67,16	67,25	75,20	74,27	74,74	A5, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	25	56,91	56,92	57,11	56,98	61,86	63,37	61,86	A5, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	26	67,33	66,43	66,27	66,68	67,55	68,42	67,99	A4, B3, C6, D4, D9, D13, D14, E5
5	27	50,90	51,27	50,44	50,87	64,26	65,45	64,86	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	28	57,10	56,55	56,86	56,84	63,75	64,44	64,10	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	29	55,43	54,94	54,98	55,12	60,11	59,91	60,01	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	30	60,92	60,74	60,62	60,76	62,16	64,27	63,22	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	31	56,08	57,24	55,68	56,33	60,43	62,00	61,22	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	32	58,25	58,28	57,30	57,94	65,15	64,22	64,69	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	33	49,35	48,76	48,79	48,97	58,72	58,07	58,40	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	34	53,45	53,38	53,44	53,42	59,16	55,20	57,18	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	35	59,38	59,05	58,62	59,02	63,01	63,97	63,49	A4, B3, C6, D4, D9, D13, D14, E5
6	36	56,90	56,77	56,84	56,84	59,05	59,96	59,51	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	37	55,63	56,48	56,54	56,22	57,52	58,31	57,92	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	38	60,09	60,68	60,25	60,34	59,06	60,57	59,82	A4, B3, C6, D4, D9, D13, D14, E5
	39	53,71	52,90	52,92	53,18	60,88	61,40	61,14	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
	40	58,71	58,81	58,36	58,63	54,80	61,87	58,34	A4, B3, C6, D4, D9, D13, E5
7	41	65,59	66,46	66,19	66,08	66,75	68,87	67,81	A3, B3, C5, D4, D13, D14, E5
	42	68,48	67,77	67,44	67,90	68,14	69,00	68,57	A3, B3, C5, D4, D13, E5
	43	57,75	58,63	57,41	57,93	59,30	57,26	58,28	A3, B3, C5, D4, D13, E5
Nº. total de provetes: 41 visto que * não cumprem os requisitos da dimensão									
Nota: D13 quando a textura é A4 associa-se a núcleos com pequenas amígdalas quando comparadas com as de A3									



A5, B3, C5, D9, D13, E5



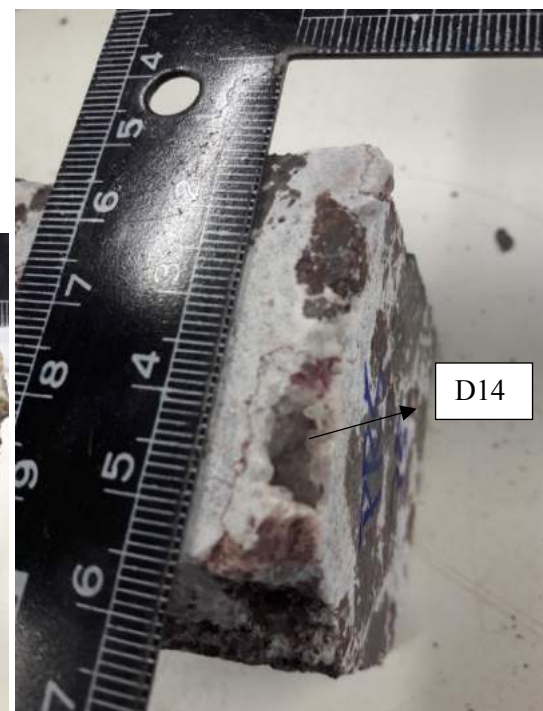
A3, B3, C5, D13, E5



A3, B3, C5, D4, D9 (veios finos), D13, E5



A4, B3, C6, D13, D9, E5

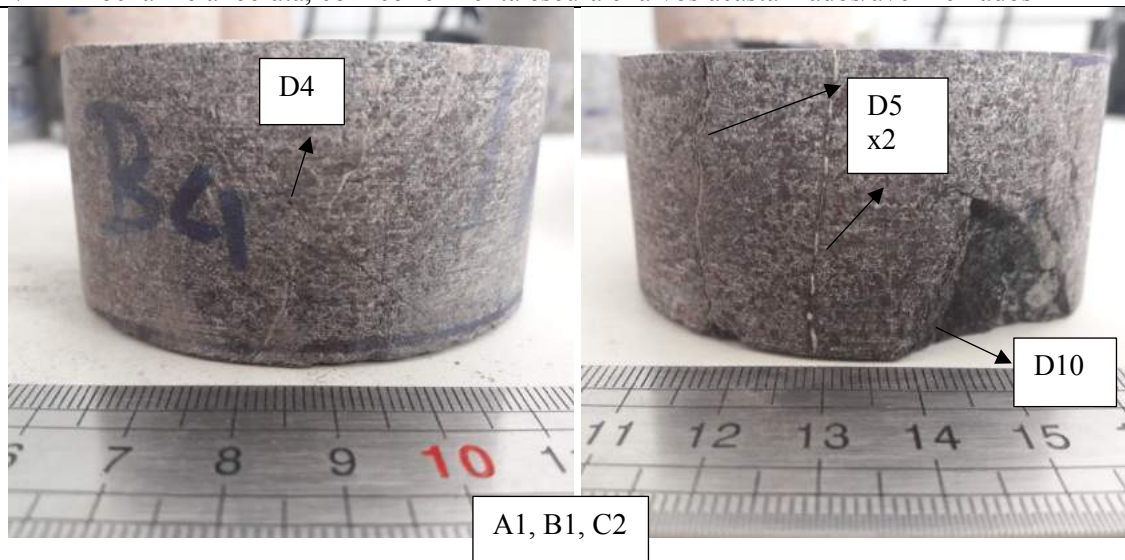


A.4 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO INDIRECTA

Tabela A.10 Caracterização dos provetes de BLV para o ensaio de RTB e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BLV		Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira analógica com incerteza $\pm 0,025$ mm			Localização: 38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W			
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Grupo	nº.									
I	1	71,80	71,80	71,60	71,7	38,10	38,40	38,10	38,2	A1, B1, C1, D1, D10, E2
	2	71,70	71,40	71,60	71,6	32,90	32,80	32,90	32,9	A1, B1, C2, D5
	3	71,30	71,40	71,40	71,4	35,50	35,60	35,50	35,5	A1, B1, C2, D5, D10, D11
	4	71,80	71,40	71,50	71,6	35,60	35,70	36,00	35,8	A1, B1, C2, D4, D5, E2
	5	71,10	71,45	71,40	71,3	33,20	33,30	34,00	33,5	A1, B1, C1, D10, E2
	6	71,40	71,80	71,65	71,6	36,90	36,30	36,70	36,6	A1, B1, C2, D10, E2
	7	71,60	71,70	71,70	71,7	36,10	36,50	36,40	36,3	A1, B1, C2, D6, E2
	8	71,70	71,80	71,70	71,7	34,10	34,00	34,30	34,1	A1, B1, C2, D4, D5, D10, E2
	10	71,50	71,40	71,90	71,6	34,70	33,50	34,60	34,3	A1, B1, C2, D5, E2
	15	71,80	71,85	71,75	71,8	36,60	37,50	36,80	37,0	A1, B1, C2, D2, D5, E2
	16	71,60	71,60	71,50	71,6	34,70	34,60	34,70	34,7	A1, B1, C2, D5, E2
	17	71,55	71,60	71,50	71,6	38,10	38,05	38,30	38,2	A1, B1, C2, D5, E2
	18	71,70	72,10	71,70	71,8	34,20	34,45	34,30	34,3	A1, B1, C2, D2, D10, E2
	19	71,85	71,90	71,90	71,9	35,50	35,10	35,75	35,5	A1, B1, C1, D1, E2
Nº. total de provetes: 14										
II.a	3	70,90	70,85	70,70	70,8	36,20	35,80	35,35	35,8	A1, B1, C2, D8, E2
	4	70,80	70,90	70,90	70,9	35,50	35,95	35,60	35,7	A1, B1, C2, D8, E2

	5	70,70	70,90	71,10	70,9	38,00	38,00	38,10	38,0	A1, B1, C2, D6, D8, E2
	6	70,80	70,75	70,85	70,8	36,10	35,30	35,40	35,6	A1, B1, C2, D8, E2
	7	71,00	70,65	71,00	70,9	37,20	37,75	38,10	37,7	A1, B1, C2, D3, D8, D12 ^(c)
	8	83,00	83,00	82,95	83,0	42,65	42,50	42,60	42,6	A1, B1/B2, C2, D8, D9, D12 ^(c)
	9	82,90	83,00	83,10	83,0	39,00	39,00	39,10	39,0	A1, B1/B2, C2, D8, D10
	10	83,00	82,40	83,00	82,8	36,80	37,90	37,30	37,3	A1, B1/B2, C2, D8, D10
	13	71,10	71,50	71,70	71,4	35,00	35,10	35,70	35,3	A1, B1, C2, D6, D8, E2
II.b	1	71,40	71,50	71,40	71,4	35,10	36,80	35,20	35,7	A1, B1, C3, D8
	2	83,20	83,90	83,70	83,6	41,95	41,90	42,40	42,1	A1, B1, C3, D8, E2
	5	83,70	83,70	83,60	83,7	41,60	41,60	42,10	41,8	A1, B2, C4, D8, D10 (x2), E2
Nº. total de provetes: 12										
B1/B2 – rocha melanocrata, com cor cinzenta escura e laivos acastanhados/avermelhados										



GRUPO I

GRUPO I

A1, B1, C1, D10



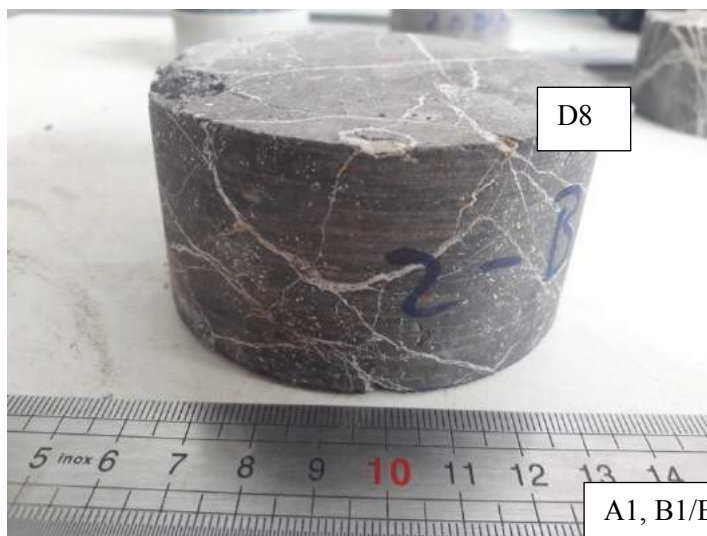
GRUPO II

D6



A1, B1, C2

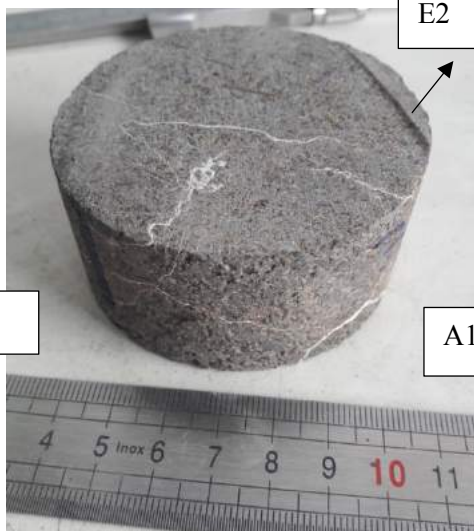
D8



A1, B1/B2, C2

E2

D8



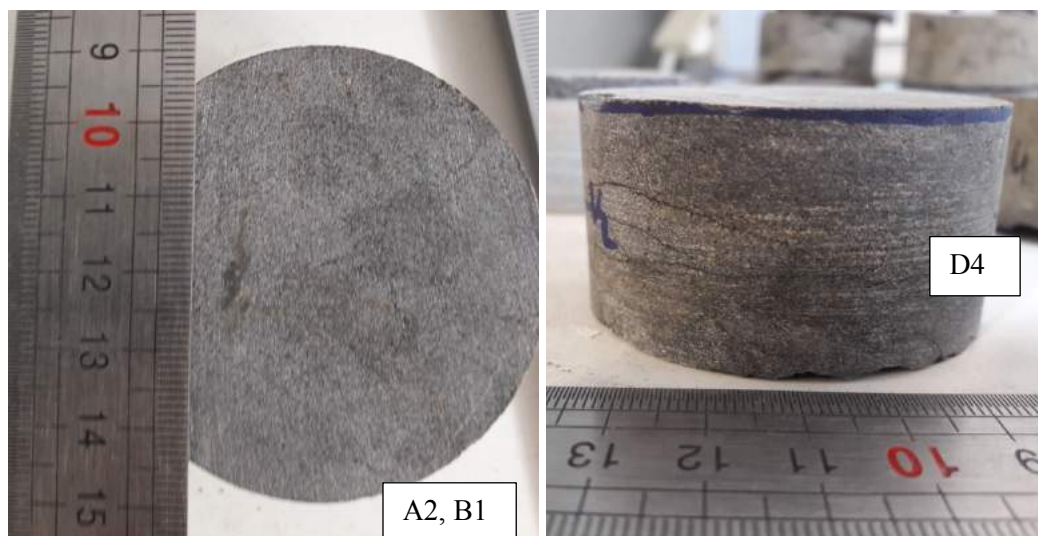
A1, B1, C4

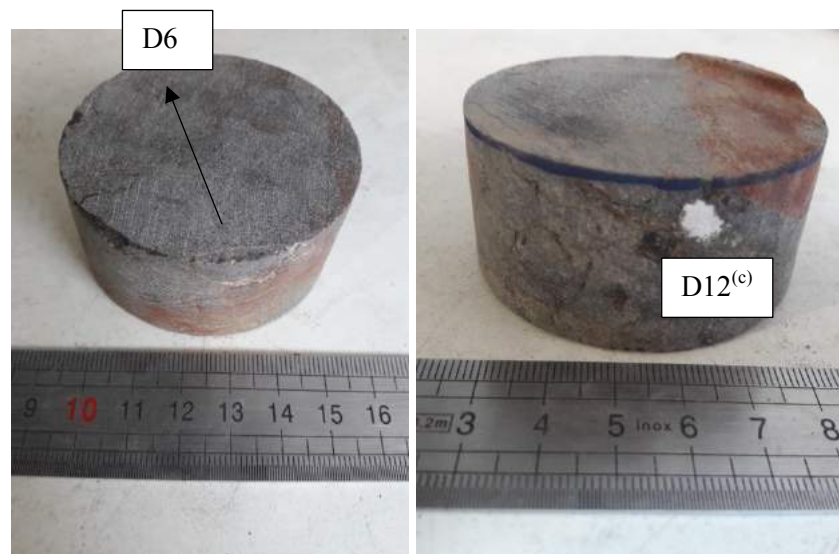
Tabela A.11 Caracterização dos provetes de BLA para o ensaio de RTB e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BLA		Origem: CVL			Instrumento de medição: craveira analógica com incerteza ± 0,025 mm			Localização: 38°45'33,45"N e 9°13'15,95"W		
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Grupo	n.º									
I	1	61,10	60,90	61,05	61,0	32,00	31,70	32,05	31,9	A2, B1, C3, D4, D6
	2	60,90	60,90	61,00	60,9	28,80	28,60	29,90	29,1	A2, B1, C3, D4
	3	61,10	61,20	61,20	61,2	27,30	27,60	27,40	27,4	A2, B1, C3, D4, D5, E2
	4	61,10	61,10	61,10	61,1	32,00	32,50	33,00	32,5	A2, B1, C3, D3, D4, D10, E2
	6	61,20	61,35	61,40	61,3	28,05	28,50	28,20	28,3	A2, B1, C3, D4, E2
	7	61,30	61,40	61,30	61,3	33,95	34,00	33,80	33,9	A2, B1, C3, D4, E2
	8	61,30	61,30	61,30	61,3	28,60	30,20	28,75	29,2	A2, B1, C3, D4, D5 (x2)
	9	61,30	61,30	61,30	61,3	32,20	32,10	32,20	32,2	A2, B1, C3, D4, D5, E2
	10	61,05	61,00	61,20	61,1	28,30	28,30	28,40	28,3	A2, B1, C3, D4, D5, D12 ^(v) , E2
	11	61,10	61,20	61,10	61,1	31,30	30,30	30,30	30,6	A2, B1, C3, D4, D6, E2
	12	61,00	61,05	61,05	61,0	28,40	28,10	28,60	28,4	A2, B1, C3, D4, E2
	13	61,05	61,10	61,10	61,1	30,70	30,60	30,80	30,7	A2, B1/B2, C3, D4, D5 (oxidado)
	14	61,10	61,30	61,30	61,2	29,00	28,70	29,50	29,1	A2, B1, C3, D4, E2, D10
	16	61,30	61,00	61,10	61,1	28,60	28,80	28,65	28,7	A2, B1/B2, C3, D4, D5, D6, D10
	17	60,80	61,10	61,00	61,0	28,00	28,50	28,20	28,2	A2, B1/B2, C3, D4, D5, E2
	18	61,00	61,10	61,00	61,0	30,40	30,75	30,50	30,6	A2, B1/B2, C3, D4, D7, E2, D12 ^(c)
	19	61,10	61,10	61,10	61,1	33,35	33,80	33,00	33,4	A1, B1, C3, D4, D5
20	60,90	61,10	61,00	61,0	30,00	30,50	29,80	30,1	A2, B1/B2, D4, D7, D10, E2	
23	61,10	61,20	61,30	61,2	26,80	26,95	27,10	27,0	A2, B1, C3, D4, D6, D9, E2	
25	61,20	61,20	61,20	61,2	30,30	30,10	30,00	30,1	A2, B1/B2, C3, D4, D7, E2	
27	61,25	61,30	61,25	61,3	32,20	31,80	31,50	31,8	A2, B1/B2, C3, D4, D10 (x2), E2	

N.º. total de provetes: 21
B1/B2 – rocha melanocrata, com cor cinzenta escura e laivos acastanhados/avermelhados
Nota: D7 nestes basaltos corresponde a fracturação F₃₋₄

II	1	70,75	71,05	70,75	70,9	30,65	31,35	31,05	31,0	A2, B2, C3, D7, E2
	2*	70,20	70,45	70,35	70,3	26,10	26,05	26,30	26,2	A2, B2, C3/C4, D7, D10, D12 ^(c) , E3
	3*	71,10	71,30	70,80	71,1	28,55	27,20	27,35	27,7	A2, B2, C3/C4, D7, D12 ^(c) , E2, E3
	4	71,00	71,15	71,05	71,1	35,60	35,00	35,75	35,5	A2, B2, C3, D6, D7, E2, E3
	5	70,85	70,85	70,80	70,8	33,90	32,55	34,35	33,6	A2, B2, C3/C4, D5, D10, E3
	6	70,95	71,00	70,85	70,9	33,10	32,40	32,60	32,7	A2, B2 C3/C4, D4, D5, D12 ^(c) , E2, E3
	7	71,00	70,90	71,25	71,1	32,30	32,90	32,35	32,5	A2, B2, C3, D7, E3
	8	70,90	70,60	70,75	70,8	32,35	32,45	32,30	32,4	A2, B2, C3, D7, D10, D12 ^(v) , E3
	9	69,75	69,75	69,75	69,8	35,60	33,95	34,30	34,6	A2, B2, C3/C4, D7, D10, D12 ^(c) e D12 ^(v) , E2, E3
	11	61,00	61,15	61,15	61,1	30,90	30,20	30,10	30,4	A2, B2, C3/C4, D7, D10, D12 ^(v) , E2
	12	61,15	61,05	61,10	61,1	29,20	29,45	30,05	29,6	A2, B1/B2, C3/C4, D7, D10, E2
	<p>Nº. total de provetes: 11</p> <p>B1/B2 – rocha melanocrata, com cor cinzenta escura e laivos acastanhados/avermelhados</p> <p>C3/C4 – rocha com alteração na matriz rochosa e fracturas, mais desagregável nas zonas mais fracturadas e oxidadas (W₂₋₃)</p> <p>Nota: D7 nestes basaltos corresponde a fracturação F₄₋₅</p>									



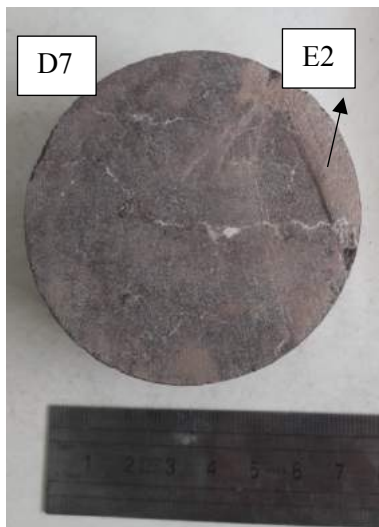


GRUPO I

A2, B2, C3, E3



D7

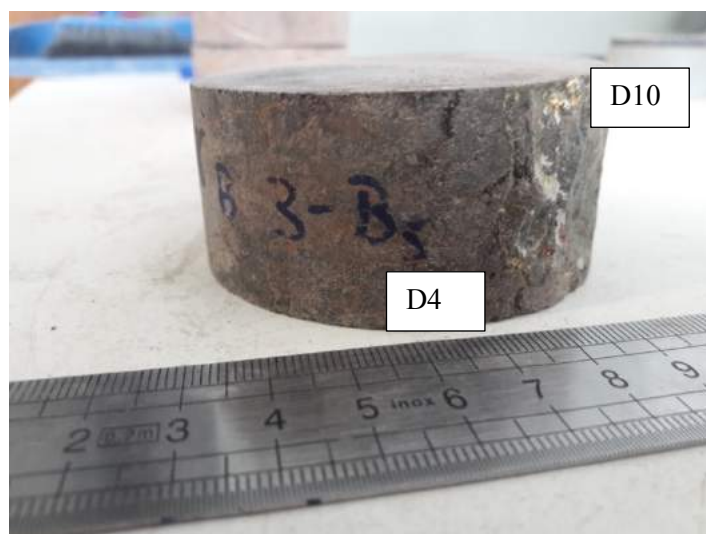


E2

D6



D10



D4

A2, B2, C3/C4, E3



D7

GRUPO II

Tabela A.12 Caracterização dos provetes de BQ para o ensaio de RTB e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BQ		Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira digital com incerteza ± 0,01 mm				Localização: 38°42'43"N e 9°15'54,29"W		
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Bloco	n°.									
1	1	60,05	60,07	60,03	60,1	25,18	25,31	25,44	25,3	A1, B1, C1, D10, E1
	3	60,10	59,87	60,01	60,0	24,81	24,40	24,46	24,6	A1, B1, C1, D1, E2
	4	60,09	60,18	60,22	60,2	29,32	29,44	29,42	29,4	A1, B1, C2, D5, E1, E2
	5	60,04	60,06	60,01	60,0	28,59	28,40	28,32	28,4	A1, B1, C1, D1, E2
	6	60,03	59,95	59,96	60,0	29,91	29,95	30,17	30,0	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	7	60,11	60,16	59,98	60,1	29,61	29,93	29,64	29,7	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	8	60,21	60,13	60,11	60,2	28,88	27,49	28,80	28,4	A1, B1, C2, D5, E1, E2
2	9	60,17	60,17	60,18	60,2	25,83	25,95	26,19	26,0	A1, B1, C1, D1, E2
	10	60,09	60,26	60,01	60,1	27,74	27,65	27,55	27,6	A1, B1, C2, D5 (x2)
3	11	60,11	60,19	60,15	60,2	28,29	27,59	27,55	27,8	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	12	60,49	60,12	60,16	60,3	27,35	27,46	27,92	27,6	A1, B1, C1, D1, E1, E2
4	13	60,12	60,04	60,11	60,1	29,93	30,00	29,89	29,9	A1, B1, C1, D2, E1, E2
	14	60,01	60,16	60,18	60,1	27,17	27,22	27,95	27,4	A1, B1, C2, D2 (x2), E1, E2
5	16	60,09	60,03	60,08	60,1	25,56	26,46	25,53	25,9	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	17*	60,02	60,13	60,17	60,1	27,57	27,65	7,30	20,8	A1, B1, C1, D1, E1, E2

	18	60,15	60,42	60,19	60,3	28,56	29,06	28,79	28,8	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	19	60,05	60,07	60,03	60,1	25,18	25,31	25,44	25,3	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	20	60,10	59,87	60,01	60,0	24,81	24,40	24,46	24,6	A1, B1, C2, D3, E1, E2
Nº. total de provetes: 18										

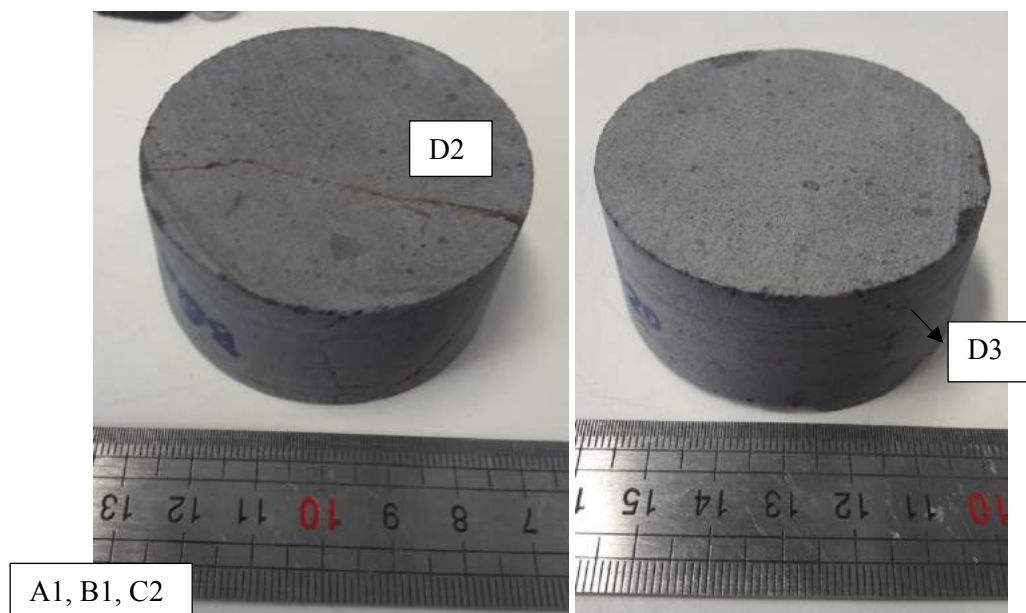
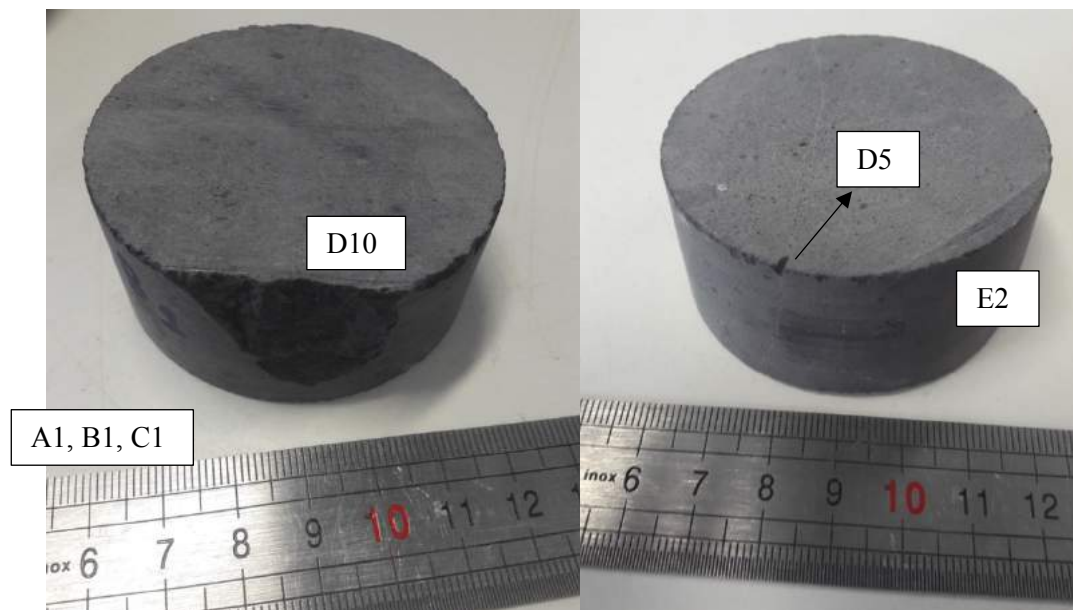
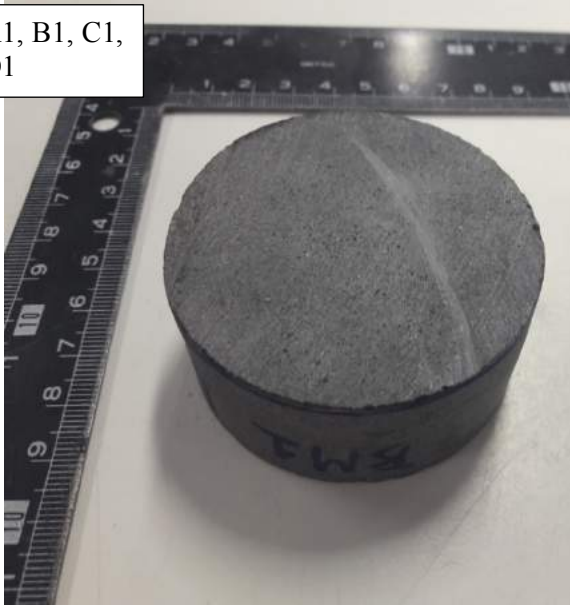


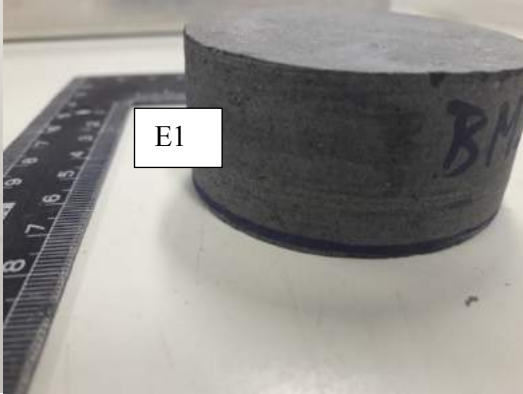
Tabela A.13 Caracterização dos provetes de BM para o ensaio de RTB e imagens dos mesmos representativas

Amostra: BM		Origem: CVL		Instrumento de medição: craveira digital com incerteza $\pm 0,01$ mm			Localização: 38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W			
Provete		D (mm)			D _{médio} (mm)	L (mm)			L _{médio} (mm)	Descrição do provete
Bloco	n°.									
1	1	60,30	60,09	60,36	60,3	27,66	28,24	28,58	28,2	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	2	60,22	60,15	60,14	60,2	29,28	29,73	29,35	29,5	A1, B1, C1, D1, E1
	3	60,20	60,29	60,27	60,3	28,51	29,03	28,63	28,7	A1, B1, C1, D1, E1
2	4	60,13	60,13	60,24	60,2	26,51	26,45	26,35	26,4	A1, B1, C1, D5 (x2), E1
	5	60,23	60,22	60,18	60,2	27,76	28,25	27,96	28,0	A1, B1, C1, D1, E1, E2
	6	60,21	60,24	60,18	60,2	29,77	29,86	29,92	29,9	A1, B1, C1, E1
	7	60,20	60,19	60,22	60,2	27,84	27,76	28,27	28,0	A1, B1, C1, E1
	8	60,15	60,13	60,22	60,2	26,97	27,06	27,03	27,0	A1, B1, C1, D10, E1
	9	60,23	60,21	60,20	60,2	29,64	29,31	29,36	29,4	A1, B1, C2, D2, E1
4	10	60,34	60,36	60,06	60,3	27,26	27,68	27,18	27,4	A1, B1, C1, D6, E1
	11	60,03	60,25	60,20	60,2	28,06	28,43	28,16	28,2	A1, B1, C1, D2, D5, E1, E2
	12	60,32	59,65	60,14	60,0	27,55	26,83	27,77	27,4	A1, B1, C2, D5 (x2), E1
Nº. total de provetes: 12										

A1, B1, C1,
D1

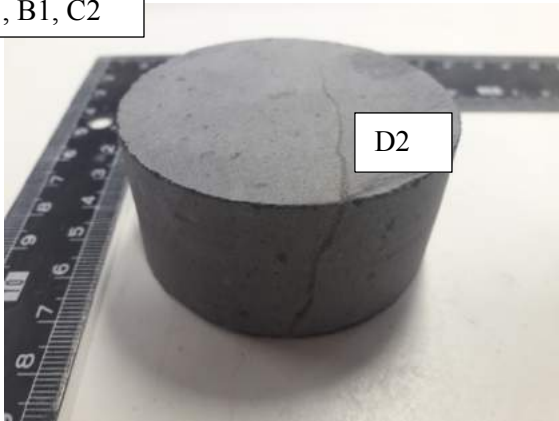


E1

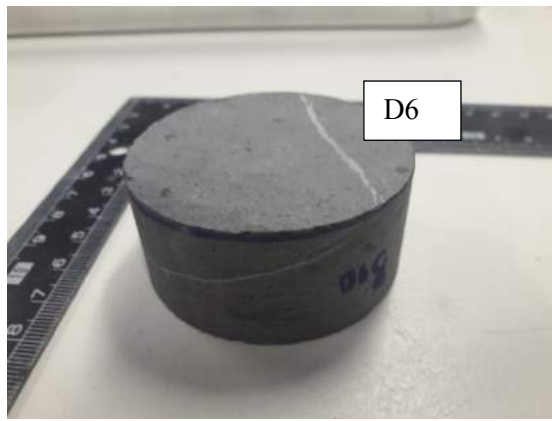


A1, B1, C2

D2

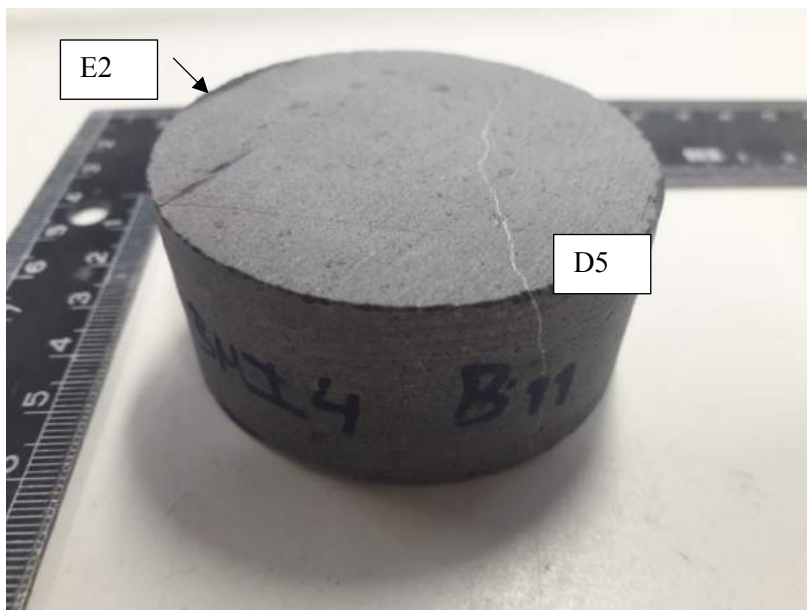


D6



E2

D5



B.DESCRICÃO DE AMOSTRA DE MÃO E PETROGRÁFICA

Tabela B.1 Tabela das abreviaturas atribuídas presentes nas tabelas e figuras da secção B

Abreviaturas dos nomes dos minerais e da natureza dos nicóis	
Ol	Olivina
Aug	Augite
Ti-Aug	Titano-augite
Plag	Plagioclase
Feldsp	Feldspatóide
Bt	Biotite
Ap	Apatite
Op	Opacos
Feldsp.Alk	Feldspato alcalino
Id	Idingsite
Serp	Serpentina
Chl	Clorite
Zeo	Zeólitos
Carb	Carbonatos
//	Nicóis paralelos
X	Nicóis cruzados

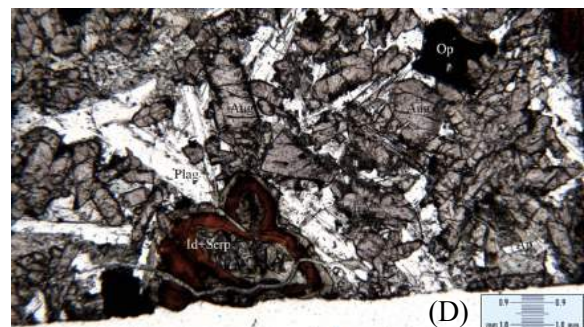
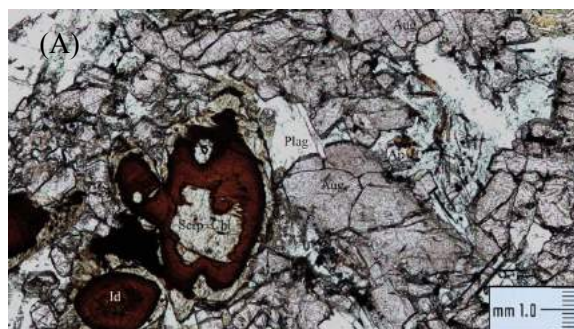
Nota: as percentagens atribuídas nas análises semi-quantitativas estão afectadas por uma incerteza de $\pm 5 \%$

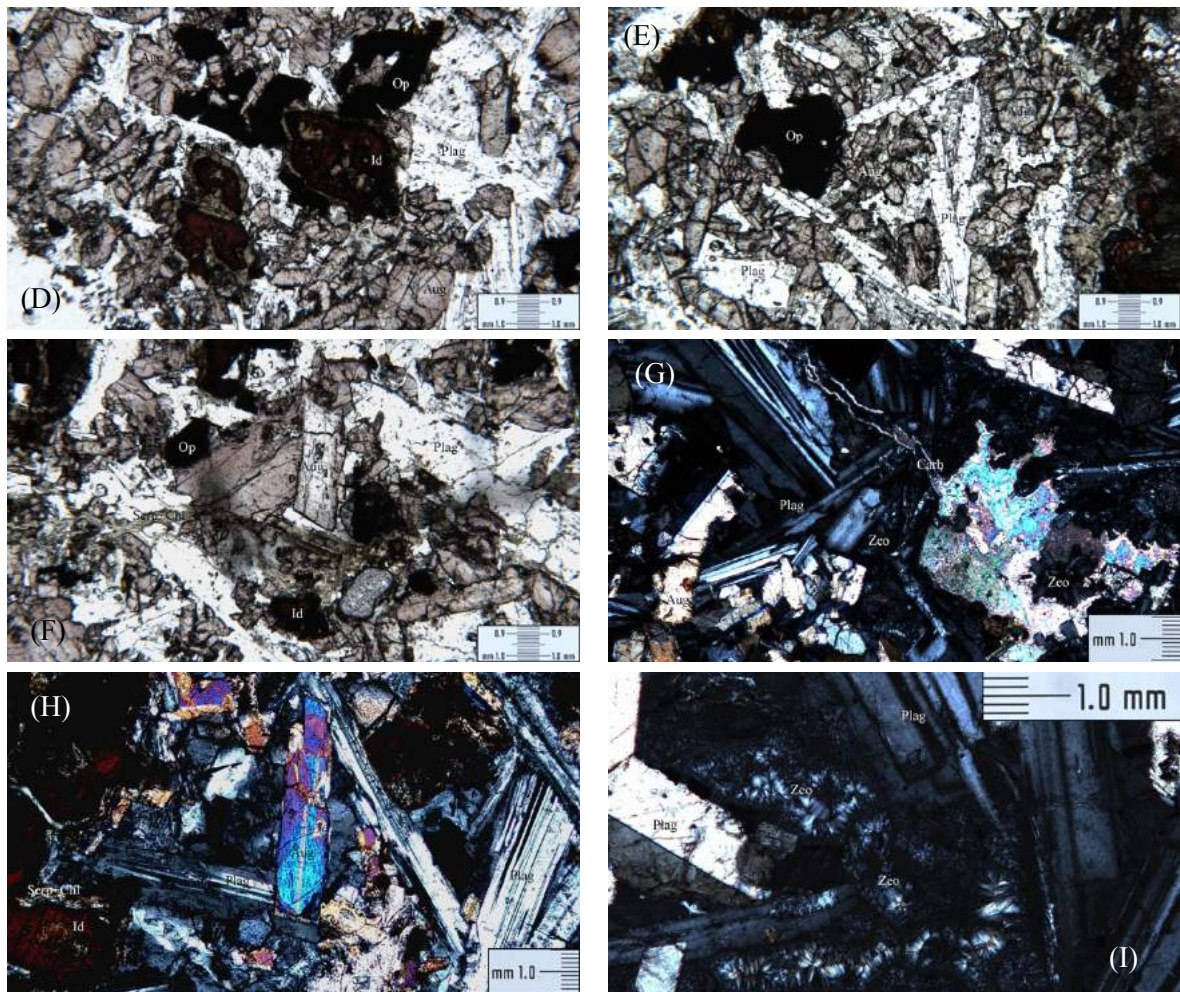
Tabela B.2 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BLVI

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)			
	Amostra nº.	Localização	Origem
Identificação	BLVI	38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W	CVL
Descrição da amostra de mão			
Cor/Intervalo de cor	cinzenta com ligeira descoloração, melanocrata		
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina (> 90% de cristais)	
	granularidade	Afanítica porfírica (geração fenocristalina em matriz microcristalina)	
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Díficeis de identificar, mas infere-se serem cerca de 20% (calcite nos veios e feldspato alcalino e plagioclase na matriz)	
	Máficos	Díficeis de identificar, mas infere-se serem cerca de 80% (piroxenas - minerais pretos com brilho vítreo em secções rectangulares a quadrangulares; olivina oxidada)	
	Fracturas	Porosidade	Cavidades
Abertas	-	Reduzida	-
Fechadas	-		
Preenchidas	Sim; com calcite e provavelmente zeólitos. As de maiores dimensões podem apresentar alguma serpentinização		
Meteorização/ alteração	Matriz rochosa pouco alterada, sendo que há descoloração e oxidação juntos aos veios calcíticos. Em superfícies expostas fracturadas ocorre serpentinização		
Presença de fósseis	-		
Presença de xenólitos	-		
Descrição microscópica			
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina (> 90% de cristais)	
	granularidade	Afanítica porfírica (geração de fenocristais em matriz microcristalina)	
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: euédricos, sub-euédricos, anédricos matriz: euédricos, sub-euédricos, anédricos	
	texturas especiais	Textura ofítica (cristais de plagioclase não orientados engoblados por piroxenas) e sub-ofítica (cristais de plagioclase em arranjo inter cruzado e espaços intersticiais ocupados por piroxenas)	

Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos
		<ul style="list-style-type: none"> Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite) 	<ul style="list-style-type: none"> Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se alterado (serpentina e idingsite) Augite titanífera: mineral castanho-rosado pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem mas só se observa uma pois apenas se observam cristais prismáticos. Apresenta tintas de birrefringência de 2ª. ordem Opacos: óxidos de Fe (como a magnetite) e provavelmente espinela associada à olivina Apatite: mineral incolor, de relevo moderado, que ocorre segundo cristais prismáticos ou secções basais hexagonais; com extinção recta (rara)
	Secundária	<ul style="list-style-type: none"> Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas; Serpentina + Clorite: alteração observável essencialmente associada aos fenocristais de olivina. A sua mistura confere cor esverdeado/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas; Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefringência extrema, nunca ficando isótropo Anfibola castanha (?) 	
	fenocristais	Olivina e Ti-Augite	
	microfenocristais	-	
	matriz	Plagioclase e Ti-Augite	

Quantificação	volume (%)*	Primários	Secundários		Total
	*determinação semi-quantitativa	Olivina: 27%	Idingsite: 40%		Id: 11% Serp+Chl: 16% Ti-Aug: 40% Plag: 27% Zeo: 1 % Carb: 0 % Opacos: 5%
			Serp+Chl: 60%		
			Não alterado: -		
		Ti-Augite: 40%	-		
		Plagioclase: 28%	Zeólito: 4%		
			Carbonato: 1%		
			Não alterado: 95%		
	Opacos: 5%				
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades	Porosidade reduzida; Algumas microcavidades mas preenchidas com zeólitos			
	Fracturas	Fissura com clorite e serpentina; microfissuras transgranulares e intragranulares na plagioclase, por vezes associadas a zeólitos; fracturas de pequenas dimensões			
Grau de alteração		Alteração hidrotermal das olivinas; grau de alteração em termos de competência: W ₁₋₂			
Notas		-			
Classificação		Basalto de tendência alcalina			
Informação complementar					
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basalto	
		Hipabissal H			
		Vulcânica V			





(A), (B) Mineralogia primária do basalto BLVI e produtos de alteração da olivina, // (x10); (C), (D), (E) e (F) Mineralogia primária e secundária do basalto BLVI e sua textura porfírica plagioclases bem desenvolvidas em textura sub-óptica em (E), // (x5); (G) e (H) Mineralogia primária e secundária dos basaltos BLVI, dando destaque às cavidades com carbonato e zeólito, X (x10); (I) Espaços inter e intragranulares da plagioclase com zeólitos, X (x25)

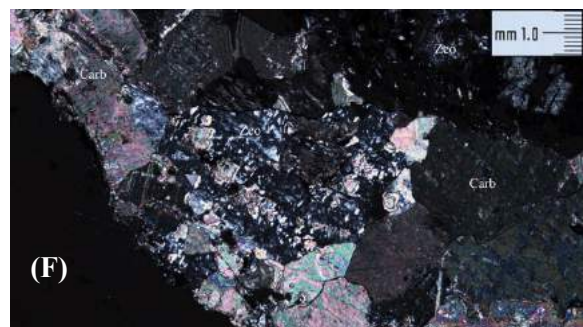
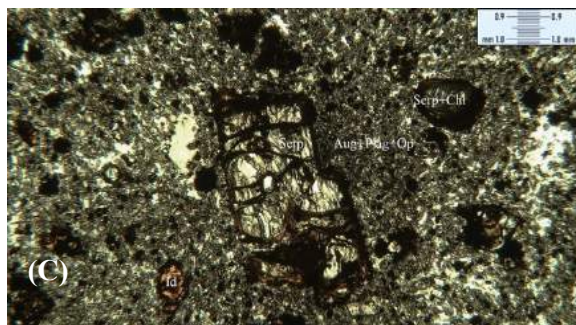
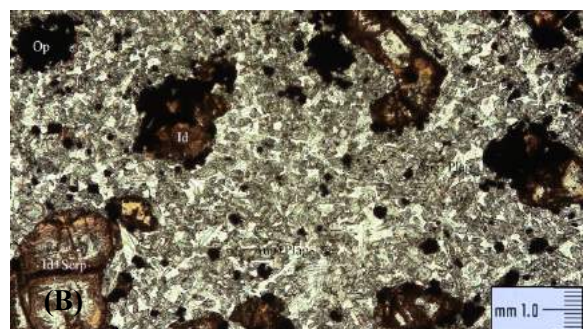
Figura B.1 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BLVI

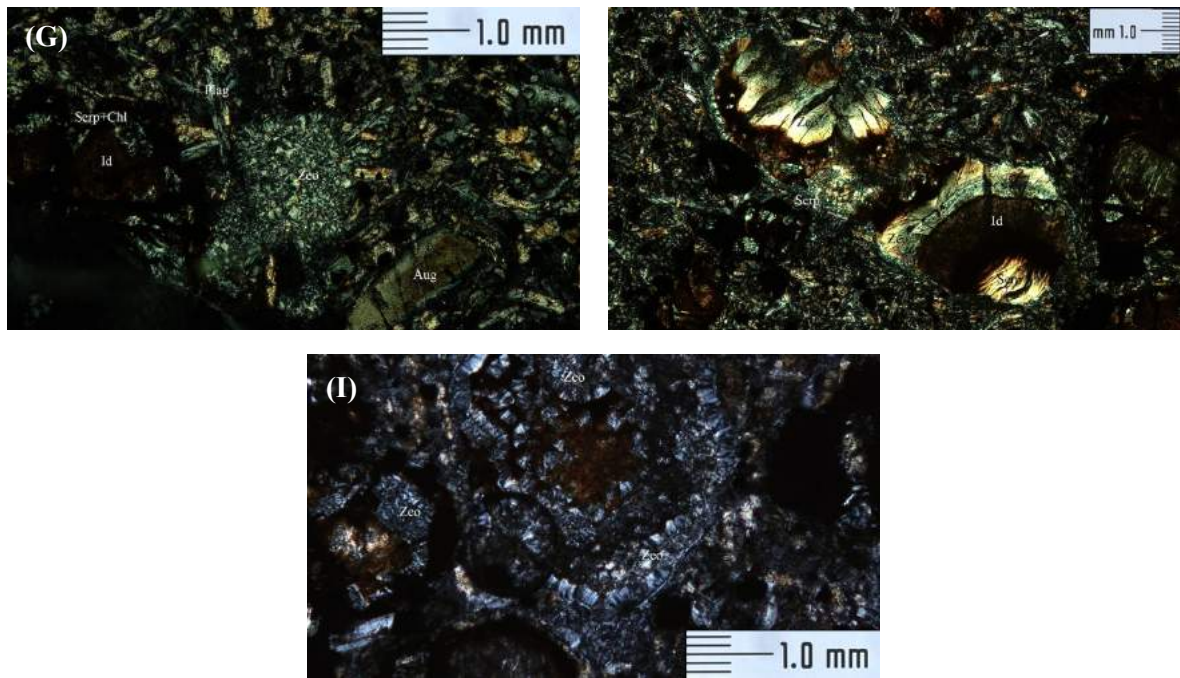
Tabela B.3 Descrição macroscópica e microscópica da sub-amostra BLVII.a

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)				
	Amostra nº.	Localização	Origem	
Identificação	BLVII.a	38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W	CVL	
Descrição da amostra de mão				
Cor/Intervalo de cor	cinzenta acastanhada com laivos brancos devido aos veios, melanocrata			
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)		
	granularidade	Afanítica porfírica (geração fenocristalina em matriz microcristalina)		
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Díficeis de identificar, mas infere-se serem cerca de 20% (calcite nos veios e feldspato alcalino e plagioclase na matriz)		
	Máficos	Díficeis de identificar mas infere-se serem cerca de 80% (piroxenas oxidadas)		
	Fracturas		Porosidade	Cavidades
Abertas	-		Reduzida	-
Fechadas	-			
Preenchidas	Sim; com calcite e provavelmente zeólitos, mais frequentes			
Meteorização/ alteração	Matriz rochosa apresenta-se muito pouco alterada, sendo que a descoloração e a oxidação ocorre em torno dos veios			
Presença de fósseis	-			
Presença de xenólitos	-			
Descrição microscópica				
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina		
	granularidade	Afanítica porfírica (matriz microcristalina mais fina do BLVI)		
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: euédricos a anédricos Matriz: sub-euédricos a anédricos		
	texturas especiais	-		
Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos	
		<ul style="list-style-type: none">Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite)	<ul style="list-style-type: none">Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se	

			<div>alterado (serpentina e idingsite); de pequena dimensão a média</div> <ul style="list-style-type: none">• Augite titanífera: mineral castanho-rosado pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto. Apresenta-se na matriz e como fenocristais segundo cristais prismáticos, sendo identificada facilmente devido à cor e às tintas de 2ª. ordem.• Opacos: óxidos de Fe (magnetite); na matriz e inclusos na olivina	
	Secundária	<ul style="list-style-type: none">• Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas;• Serpentina + Clorite: alteração observável essencialmente associada à olivina (em redor ou interior). A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas;• Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos• Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefrangência extrema, nunca ficando isótropo		
	fenocristais	Olivina e Ti-Augite		
	microfenocristais	-		
	matriz	Ti-Augite e Plagioclase		
Quantificação	volume (%)* *determinação semi-quantitativa	Primários	Secundários	Total
		Olivina: 25%	Id: 70%	Id: 18% Serp+Chl: 7% Ti-Aug: 30% Plag: 12% Zeo: 11% Carb: 3% Serp: 14% Opacos:5% Total (Serp): 21%
			Serp+Chl: 30%	
			não alterado: -	
		Augite: 50%	Não alterado: 60% Carb:5%	
		Plagioclase: 20%	Zeólitos:15% Serpentina: 20%	
Opacos: 5%				
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Pouco porosa e microcavidades com zeólitos e carbonatos		
	Fracturas	Maioria preenchidas com zeólitos ou serpentina. Microfissuras transgranulares e intergranulares na matriz, com serpentina e zeólitos, indo desde grandes a pequenas dimensões		

Grau de alteração	Alteração hidrotermal das olivinas e da matriz; grau de alteração em termos de competência: W ₂₋₃		
Notas	-		
Classificação	Basaltos com tendência alcalina		
Informação complementar			
Tipo (V)	Plutónica P	QAPF	Basaltos
	Hipabissal H		
	Vulcânica V		





(A) e (B) Mineralogia e textura afanítica profírica, de natureza mais fina face a BLVI, // (x10); (C) Fenocristais e microfenocristais de olivina alterada para serpentina e idingsite em matriz com augite, plagioclase e opacos, // (x5); (D) e (H) Fenocristal de olivina alterado para idingsite e rodeado por zeólitos, // e X, respectivamente (x10); (E) Veio com serpentina e algum zeólito, // (x5); (F) Cavidade preenchida maioritariamente por carbonatos, X (x10); (G) e (I) Cavidades preenchidas por zeólitos, X (x25)

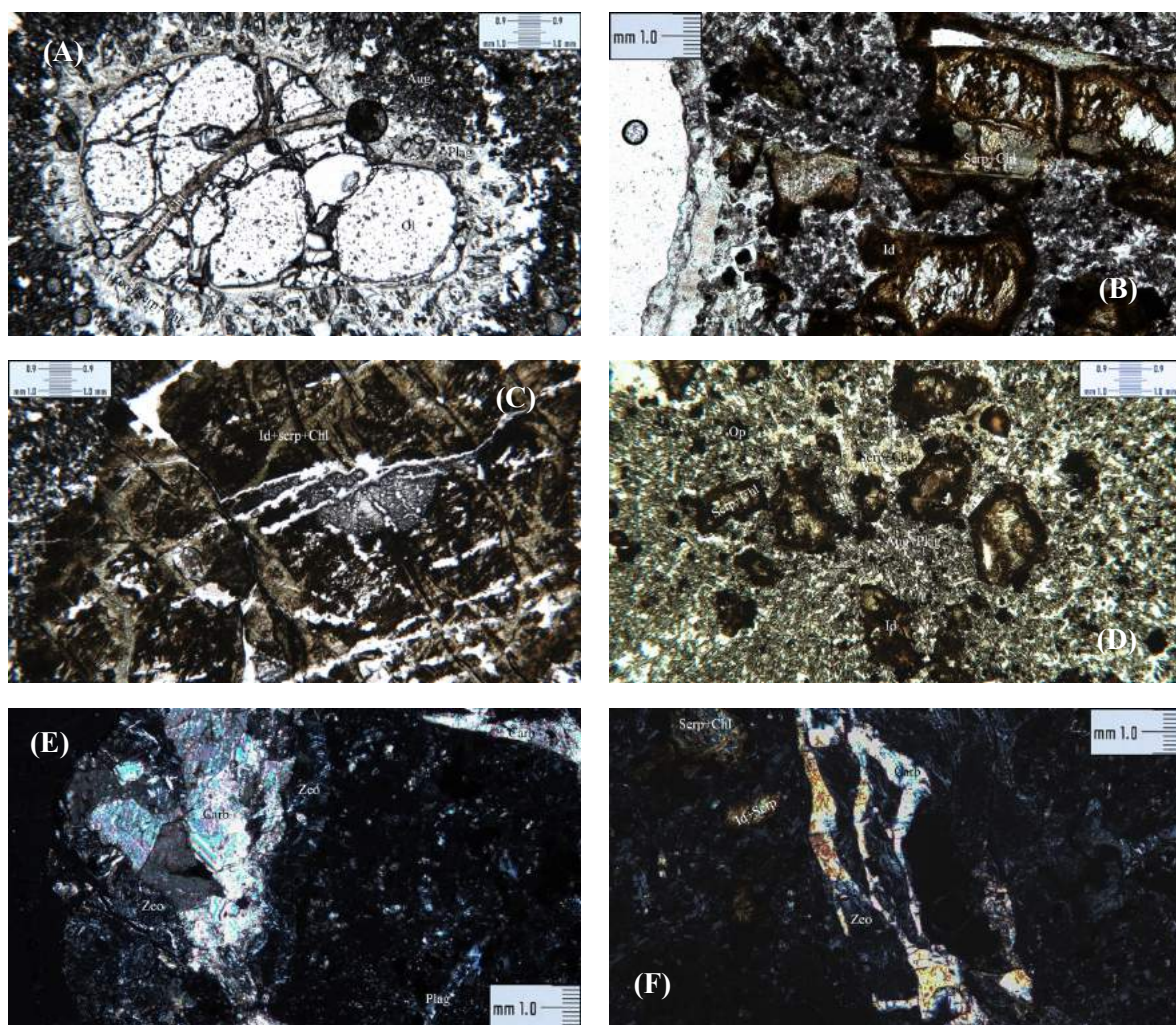
Figura B.2 Secções exemplo da lâmina delgada da sub-amostra BLVII.a

Tabela B.4 Descrição macroscópica e microscópica da sub-amostra BLVII.b

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)				
	Amostra nº.	Localização	Origem	
Identificação	BLVII.b	38°44'6,16"N e 9°9'7,23" W	CVL	
Descrição da amostra de mão				
Cor/Intervalo de cor	cinzenta a acastanhada com ligeira descoloração e laivos brancos devido aos veios, melanocrata			
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)		
	granularidade	Afanítica porfírica (geração fenocristalina em matriz microcristalina)		
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Díficeis de identificar, mas infere-se serem cerca de 20% (calcite nos veios e feldspato alcalino e plagioclase na matriz)		
	Máficos	Díficeis de identificar, mas infere-se serem cerca de 80%		
	Fracturas		Porosidade	
Abertas	-		Moderada	Pequenas vesículas preenchidas por calcite
Fechadas	Sim, com orientações variadas			
Preenchidas	Sim; com calcite e provavelmente zeólitos e com orientações diversas.			
Meteorização/ alteração	Matriz rochosa alterada e descolorada, com maior porosidade e intersectada por uma rede de veios onde se observa também sinais de alteração (descoloração). Dado o grau de fracturação e alteração, a rocha é mais friável			
Presença de fósseis	-			
Presença de xenólitos	-			
Descrição microscópica				
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina		
	granularidade	Afanítica porfírica (com matriz microcristalina fina)		
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: sub-euédricos a anédricos matriz: sub-euédricos a anédricos		
	texturas especiais	Textura coronítica (fenocristal de olivina com “coroa” de plagioclases e serpentina em seu redor)		
Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos	
		<ul style="list-style-type: none">Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite)	<ul style="list-style-type: none">Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção	

			<p>recta e apresenta-se alterado (serpentina e idingsite); de pequena dimensão a média</p> <ul style="list-style-type: none">• Augite titanífera: mineral castanho-rosado pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto. Apresenta-se na matriz e como microfenocristais segundo cristais prismáticos, sendo identificada facilmente devido à cor e às tintas de 2ª. ordem.• Opacos: óxidos de Fe (magnetite); na matriz e inclusos na olivina	
	Secundária	<ul style="list-style-type: none">• Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas;• Serpentina + Clorite: alteração observável essencialmente associada à olivina (em redor ou interior). A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica/granular em nicóis cruzados, com baixas tintas;• Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos• Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefrangência extrema, nunca ficando isótropo		
	fenocristais	Olivina		
	microfenocristais	Olivina e Ti-Augite		
	matriz	Plagioclase; Ti-Aug; Zeólitos		
Quantificação	volume (%)*	Primários	Secundários	Total
	*determinação semi-quantitativa	Olivina: 30%	Id: 40%	Olivina: 3% Idingsite: 12% Serp+Chl: 15% Ti- Aug: 16% Plag: 11% Zeo: 24% Carb: 3% Serp+(+Chl): 13% Opacos: 3% Total (Serp+Chl): 28%
			Serp+Chl: 50%	
			não alterado: 10%	
		Ti-Augite: 40%	Zeo: 35% Carb: 5%	
		Plagioclase: 27%	Serp(+Chl): 20% Não alterado: 40%	
Opacos: 3%				
Descont inuidad	porosidade/ microcavidades (grau)	Rocha com porosidade, apesar de pouca, maior do que as restantes amostras de BLV. Cavidades com zeólito e carbonatos		

	Fracturas	Fracturas de pequena a elevada dimensão, com zeólitos e calcite, por vezes também serpentina ou sem preenchimento. Fissuras inter e transgranulares na matriz.		
Grau de alteração		Alteração hidrotermal das olivinas e da matriz; grau de alteração em termos de competência: W ₃		
Notas		-		
Classificação		Basalto de tendência alcalina		
Informação complementar				
Tipo (V)	Plutónica P	QAPF	Basalto	
	Hipabissal H			
	Vulcânica V			



(A) Fenocristal de olivina fracturado e com serpentina nas fissuras e com uma textura coronítica (envolto por plagioclase), // (x5); (B) Fenocristais de olivina serpentinizados e alterados para idingsite em matriz microcristalina de augite, plagioclase e opacos, // (x10); (C) Alteração e fracturação da olivina, // (x5); (D) Textura afanítica porfírica, de menor granularidade face às restantes amostras BLV, // (x5); (E) e (F) Preenchimento por carbonato e zeólitos das fissuras, X (x10)

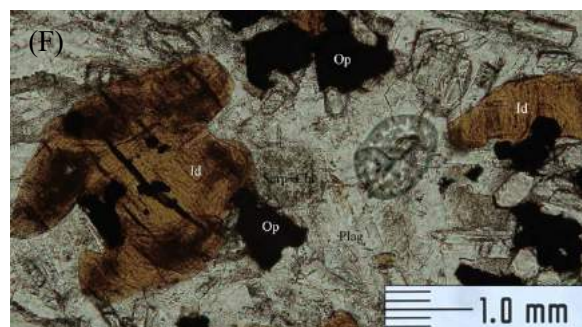
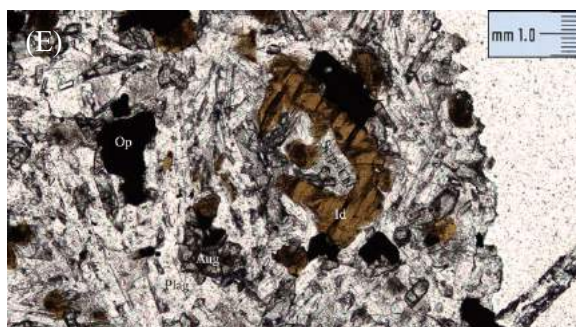
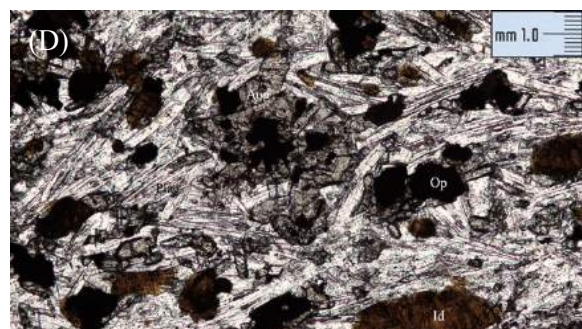
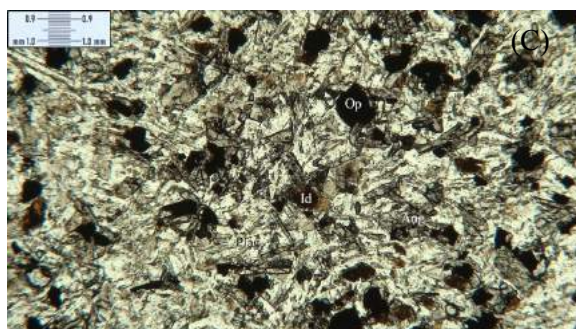
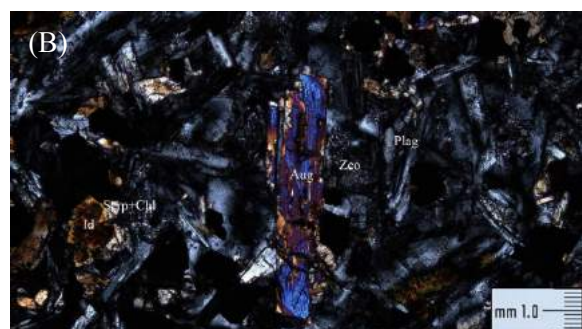
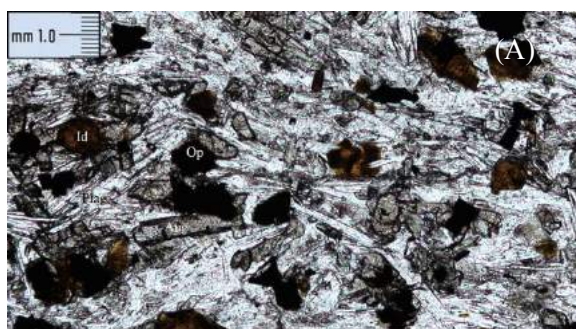
Figura B.3 Secções exemplo da lâmina delgada da sub-amostra BLVII.b

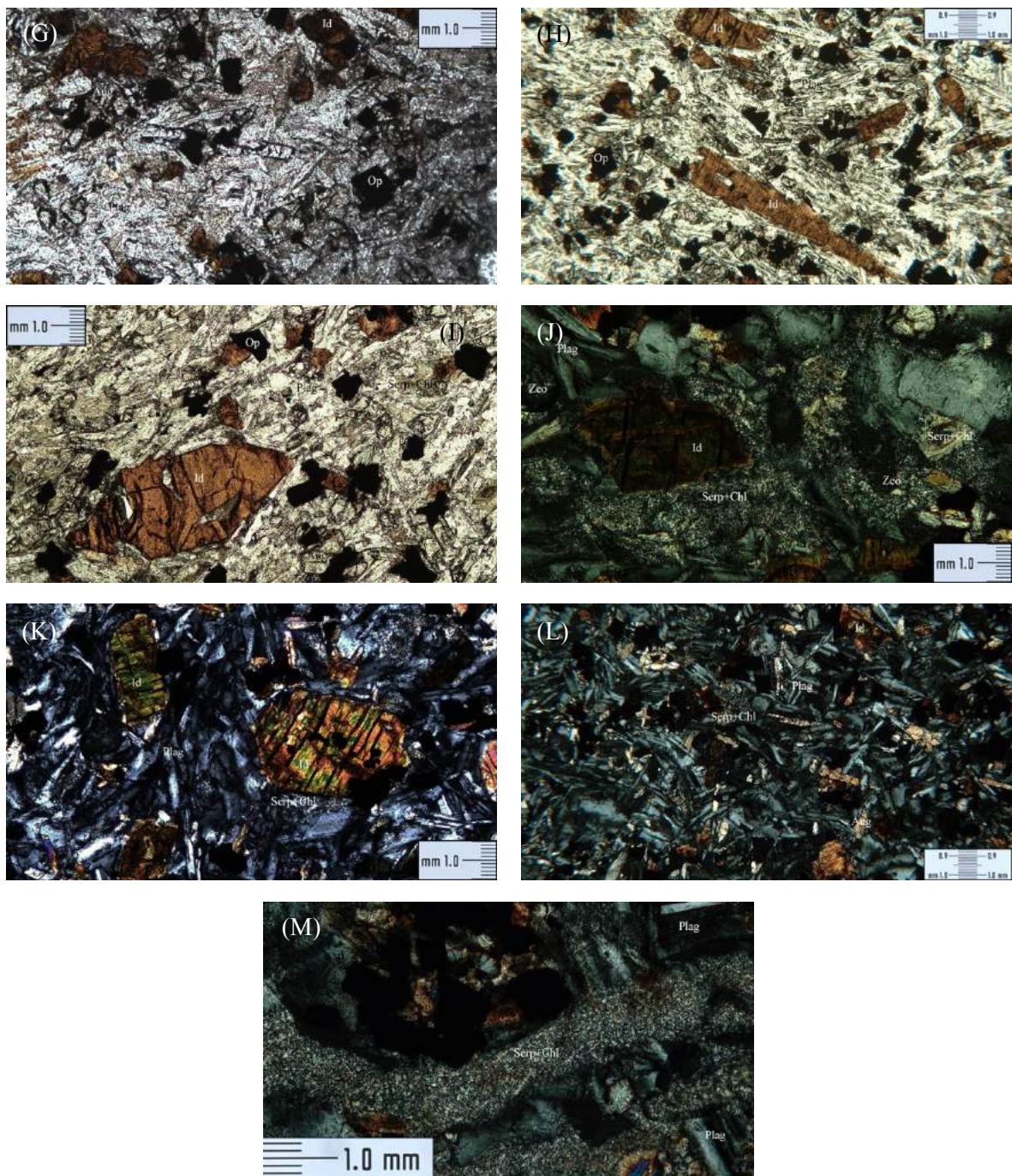
Tabela B.5 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BLAI

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)				
	Amostra nº.	Localização	Origem	
Identificação	BLAI	38°45'33,45"N e 9°13'15,95"W	CVL	
Descrição da amostra de mão				
Cor/Intervalo de cor	Cinzenta descolorada, melanocrata			
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)		
	granularidade	afanítica (minerais de granulometria tão fina que impede a sua identificação a olho nu). Não se distingue geração porfíritica		
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Não identificáveis a olho nu; mas infere-se serem cerca de 20%		
	Máficos	Não identificáveis a olho nu; mas infere-se serem cerca de 80%		
	Fracturas		Porosidade	Cavidades
Abertas	-		Reduzida	-
Fechadas	Sim; com orientação variável			
Preenchidas	Sim; com orientação variável mas essencialmente sub-horizontais a ligeiramente inclinadas; pode-se dizer que na sua maioria são sub-paralelas. Com calcite e provavelmente zeólitos			
Meteorização/ alteração	Descoloração da rocha, principalmente ao longo dos veios (W ₂)			
Presença de fósseis	-			
Presença de xenólitos	-			
Descrição microscópica				
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina		
	granularidade	Afírica.Dada a presença de plagioclases orientadas diz-se microlítica fluidal		
	formas e arranjos geométricos	Microfenocristais: sub-euédricos a anédricos Matriz: euédricos a sub-euédricos		
	texturas especiais	Textura ofítica e sub-ofítica. Por vezes textura variolítica (plagioclases na matriz dispostas de forma divergente)		
Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos	
		<ul style="list-style-type: none">Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite)	<ul style="list-style-type: none">Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se	

			<p>fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se alterado (serpentina e idingsite)</p> <ul style="list-style-type: none">• Augite: mineral castanho pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem, mas só se observa uma pois apenas se observam cristais prismáticos. Apresenta tintas de birrefrangência de 2ª. ordem• Opacos: óxidos de Fe (como a magnetite) na matriz e associados à olivina• Apatite: mineral incolor, de relevo moderado, que ocorre segundo cristais prismáticos ou secções basais hexagonais; com extinção recta (rara)			
	Secundária	<ul style="list-style-type: none">• Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas (tintas elevadas);• Serpentina: minerais de alteração da olivina e augite, sendo mais rara na olivina (em seu redor essencialmente). A sua mistura confere cor amarelo ocre/esverdeado em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas;• Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos• Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefrangência extrema, nunca ficando isótropo. Associado aos zeólitos				
	fenocristais	-				
	microfenocristais	Olivina				
	matriz	Plagioclase e augite				
Quantificação	volume (%)*	Primários	Secundários	Total		
		Olivina: 15%	Id: 60%	Id: 9%		
	Augite: 30%		Serp: 40%	Serp: 6%		
			não alterado: -	Aug: 18%		
	*determinação semi-quantitativa			Plag: 28%		

		Plagioclase: 45%	não alterado: 60% Zeólito: 15% Carbonato: 5% Serpentina: 20%	Zeo:11% Carb: 3% Serp:15% Opacos:10% Total (Serp): 21%
		Opacos: 10%		
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Porosidade reduzida, sendo que existem microcavidades mas na sua maioria preenchidas por zeólito e por vezes serpentina		
	Fracturas	Microfissuras não preenchidas ou com zeólitos ou serpentina (e clorite)		
Grau de alteração		Alteração hidrotermal dos minerais presentes; grau de alteração em termos de competência: W ₂		
Notas		-		
Classificação		Basalto de tendência alcalina		
Informação complementar				
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basalto
		Hipabissal H		
		Vulcânica V		





(A); (B) e (G) Mineralogia primária e secundária de BLAI, // e X, respectivamente (x10); (C) e (D) Textura afanítica, com plagioclases divergentes (variolítica) e em torno das augite (sub-ofítica), // (x5 e x10); (E) e (F) “Idingsitização” da olivina e intersecção por minerais opacos, // (x10 e x25, respectivamente); (H) e (I) Olivinas alteradas para idingsite, alongadas e euédricas, respectivamente, // (x5 e x10); (J), (K) (L) e (M) Mineralogia primária e serpentina e clorite em veios e em torno dos cristais de idingsite; bem como zeólitos nas cavidades, principalmente associadas à plagioclase, X (x10, x5 e x25)

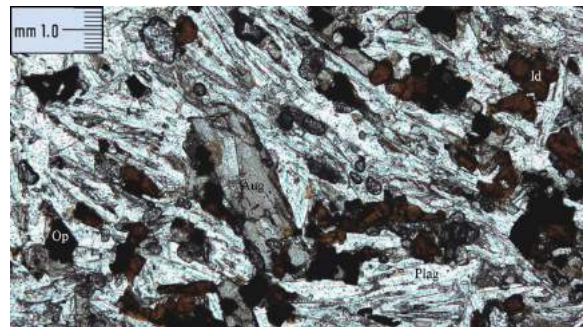
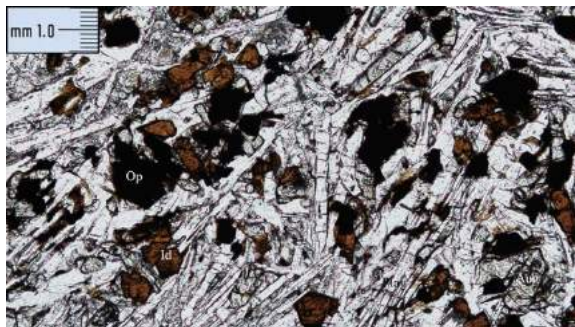
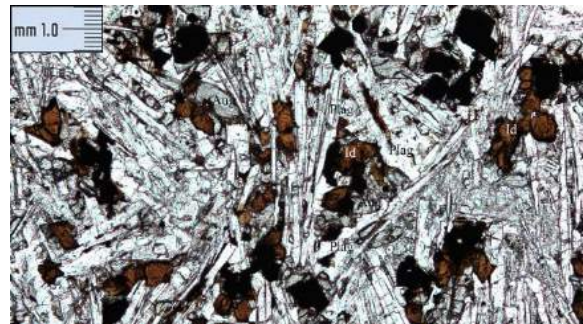
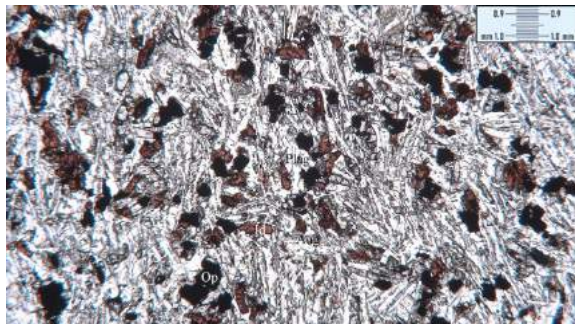
Figura B.4 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BLAI

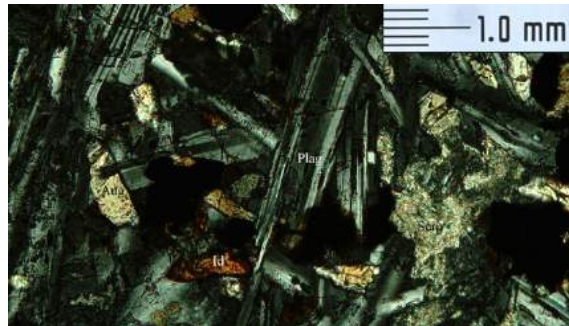
Tabela B.6 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BLAII

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)				
	Amostra nº.	Localização	Origem	
Identificação	BLAII	38°45'33,45"N e 9°13'15,95"W	CVL	
Descrição da amostra de mão				
Cor/Intervalo de cor	cinzenta arroxeada/avermelhada, principalmente em núcleos cristalinos por vezes observáveis, melanocrata			
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)		
	granularidade	afanítica (cristais não resolúveis a olho nu dado serem tão finos). Não se distingue geração porfirítica		
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Não identificáveis a olho nu; mas infere-se serem cerca de 20% (calcite nos veios predomina face a BLA)		
	Máficos	Não identificáveis a olho nu; mas infere-se serem cerca de 80%		
	Fracturas		Porosidade	Cavidades
Abertas	-		Visível, sendo mais porosa do que BLAI	-
Fechadas	Sim; com orientação variável			
Preenchidas	Sim; predominantes e com orientação variável mas essencialmente sub-horizontais a inclinadas ($\pm 45^\circ$); pode-se dizer que na sua maioria são sub-paralelas. Com calcite e provavelmente zeólitos			
Meteorização/ alteração	Ao longo da matriz rochosa, conferindo-lhe a presente cor, e em torno dos veios calcíticos (W ₂)			
Presença de fósseis	-			
Presença de xenólitos	-			
Descrição microscópica				
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina		
	granularidade	Afírica, sendo que não se reconhece uma geração de fenocristais. Dada a presença de plagioclases orientadas diz-se microlítica fluidal		
	formas e arranjos geométricos	Microfenocristais: sub-euédricos a anédricos Matriz: sub-euédrico a anédrico		
	texturas especiais	-		
M . - i	Primária	Félsicos	Máficos	

		<ul style="list-style-type: none">Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite)	<ul style="list-style-type: none">Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se alterado (serpentina e idingsite)Augite: mineral castanho pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem, mas só se observa uma pois apenas se observam cristais prismáticos. Apresenta tintas de birrefrangência de 2ª. ordemOpacos: óxidos de Fe (como a magnetite) na matriz e associados à olivinaApatite: mineral incolor, de relevo moderado, que ocorre segundo cristais prismáticos ou secções basais hexagonais; com extinção recta (rara)	
	Secundária	<ul style="list-style-type: none">Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas (tintas elevadas);Serpentina e clorite: minerais de alteração da olivina, dispondo-se em seu redor. A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas (pode, raramente, associar-se com talco);Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticosCarbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefrangência extrema, nunca ficando isótropo. Associado aos zeólitos		
	fenocristais	-		
	microfenocristais	Olivina, plagioclase e augite		
	matriz	Plagioclase e augite		
Quantific	volume (%)*	Primários	Secundários	Total
		Olivina: 15%	Id: 85%	

	*determinação semi-quantitativa		Serp+chl: 12%	Olivina: 0,4% (0%) Idingsite:13% Serp+Chl: 2% Aug:11% Plag: 19% Zeo: 19 % Carb:11% Serp+Chl: 15% Opacos:10% Total(Serp+chl): 17%
			Não alterado:3%	
		Augite: 27%	Não alterado: 40%	
		Plagioclase: 48%	Zeólitos: 25% Carbonatos:15% Serp+Chl: 20%; raro talco	
		Opacos: 10%		
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Porosidade reduzida; Cavidades com zeólito e carbonato		
	Fracturas	Microfissuras não são observadas, apenas as que afectam os minerais (inter, intra e transgranular), podendo conter zeólitos (e carbonatos) ou serpentina. Estas ocorrem de mdo significativo		
Grau de alteração		Alteração hidrotermal dos minerais presentes; grau de alteração em termos de competência: W ₂		
Notas		-		
Classificação		Basalto de tendência alcalina		
Informação complementar				
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basalto
		Hipabissal H		
		Vulcânica V		





(A) Textura afanítica, // (x5); (B), (C) e (D) Mineralogia primária e alteração dos cristais de olivina para idingsite, // (x10); (E) Cristais de plagioclase e produtos de alteração (serpentina e carbonatos), X (x25)

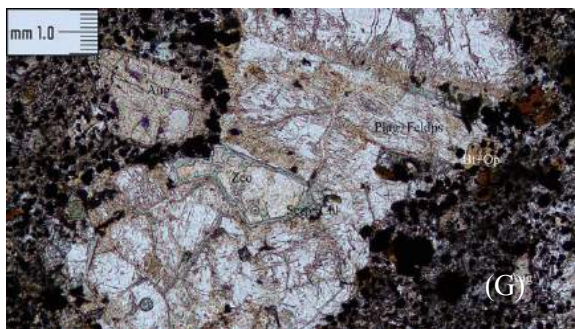
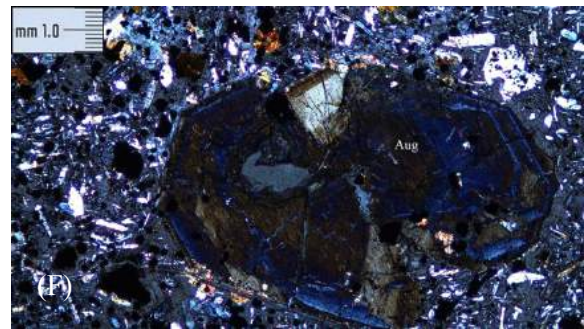
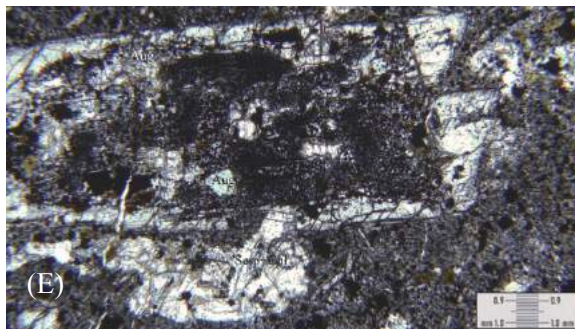
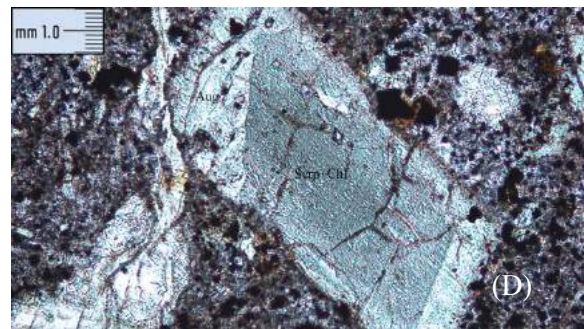
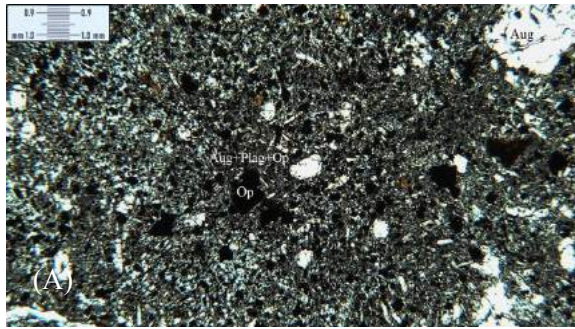
Figura B.5 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BLAII

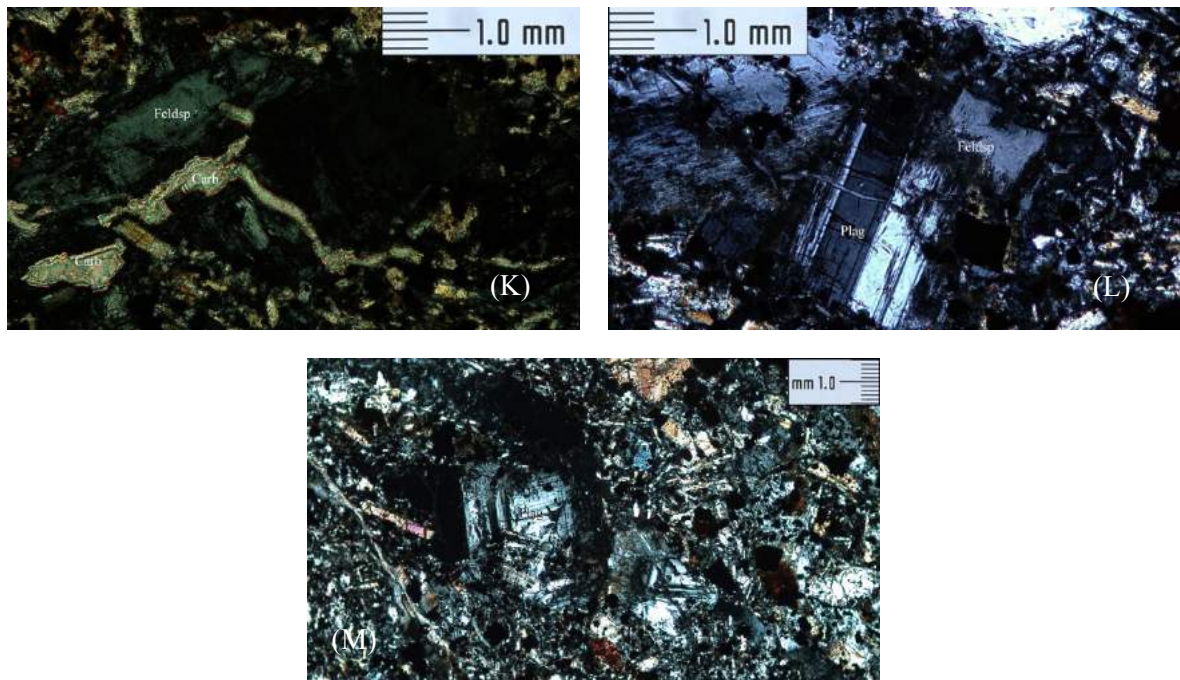
Tabela B.7 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BQ

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)			
	Amostra nº.	Localização	Origem
Identificação	BQ	38°42'43"N e 9°15'54,29"W	CVL
Descrição da amostra de mão			
Cor/Intervalo de cor	cinzenta, melanocrata		
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)	
	granularidade	afanítica (cristais não resolúveis a olho nu) porfirítica (geração de fenocristais em matriz microcristalina ou vítrea)	
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Pouco identificáveis a olho nu; mas infere-se serem cerca de 20%	
	Máficos	Pouco identificáveis a olho nu (apenas piroxenas - minerais pretos com brilho vítreo em secções rectangulares a quadrangulares, muitas vezes em agregados de maiores dimensões); mas infere-se serem cerca de 80%	
	Fracturas		Porosidade
Abertas	-		Reduzida
Fechadas	Sim, de reduzidas dimensões		
Preenchidas	-		
Meteorização/ alteração	A inexistência de fissuras observáveis na amostra de mão, sendo a rocha sã e sem descoloração (W ₁)		
Presença de fósseis	-		
Presença de xenólitos	-		
Descrição microscópica			
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina	
	granularidade	Afanítica porfirítica (matriz microcristalina a criptocristalina, havendo dificuldade na identificação dos minerais na matriz)	
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: euédricos a sub-euédricos Matriz: sub-euédrico a anédrico	
	texturas especiais	Textura esquelética da augite, bem como inclusões da matriz nesta	

Mineralogia	Primária	<p>Félsicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite); alteração e fracturação • Feldspatóide: mineral incolor e anédrico que apresenta tintas inferiores à plagioclase, dispondo-se intersticialmente. Pensa-se ser analcite 	<p>Máficos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se totalmente alterado (serpentina e idingsite) • Augite: mineral castanho pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem observáveis nas secções basais. Apresenta-se zonada e tem tintas de birrefringência de 2ª ordem nos cristais prismáticos. Apresenta frequentemente núcleos serpentinizados e cloritizados (cor verde e com as tintas características) • Opacos: óxidos de Fe (como a magnetite) na matriz • Biotite: mineral de cor castanha que se apresenta raramente na matriz; apresenta elevadas tintas de extinção e exhibe a chamada extinção em olho de perdiz
	Secundária	<ul style="list-style-type: none"> • Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas (tintas elevadas); • Serpentina e clorite: minerais de alteração da olivina, dispondo-se em seu redor. A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas; • Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos • Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefringência extrema, nunca ficando isótropo. Associado aos zeólitos 	
	fenocristais	Augite e plagioclase	

	microfenocristais	Olivina		
	matriz	Plagioclase, feldspatóide e augite		
Quantificação	volume (%)* *determinação semi-quantitativa	Primários	Secundários	Total
		Olivina: 10%	Id: -	Olivina: 1% Serp+Chl: 9% Aug: 24% Serp+Chl: 16% Plag: 24% Feldspatóide: 1% Zeo: 15 % Carb: 2 % Opacos: 5% Biotite: 3% Total(Serp+chl): 25%
			Serp+chl: 90%	
			Não alterado:10%	
		Augite: 40%	Serp+Chl: 40%	
		Plagioclase: 40%	Zeólitos: 35% Carbonatos: 5% Não alterado: 60%	
		Opacos: 5%		
		Biotite: 3 %		
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Porosidade reduzida; Cavidades com zeólito e carbonato (raro)		
	Fracturas	Microfissuras observadas na lâminas, principalmente a afectar os minerais de plagioclase e de augite (inter,intra e transgranular). Frequentemente com preenchimento (zeólitos ou serpentina)		
Grau de alteração		Alteração hidrotermal das olivinas, augites e matriz; grau de alteração em termos de competência: W _{1/2}		
Notas		O feldspatóide pode ter uma natureza tardia tal como descrito por Palácios (1985)		
Classificação		Basalto de tendência alcalina		
Informação complementar				
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basalto
		Hipabissal H		
		Vulcânica V		





(A) e (B) Textura afanítica porfírica, de matriz muito fina, // (x5 e x10); (C) e (K) Veio a intersectar os minerais, // (x5) e X (x25); (D) e (F) Cristal de augite com núcleo alterado para serpentina e clorite e zonamento, // e X (x10); (E) Inclusões de matriz em cristal de augite // (x5); (G), (I), (J), (L) e (M) Agregado de plagioclase e feldpspatóide com alteração para serpentina e clorite, que ocorre também nos veios. Cavidades inter e intra-granulares com zeólito, // e X (x10 e x25); (H) Olivina totalmente alterada para serpentina e clorite e na periferia para idingsite, // (x10)

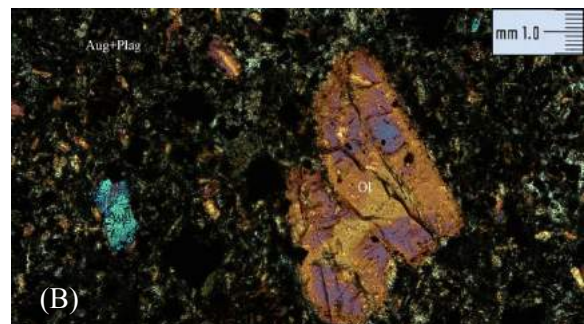
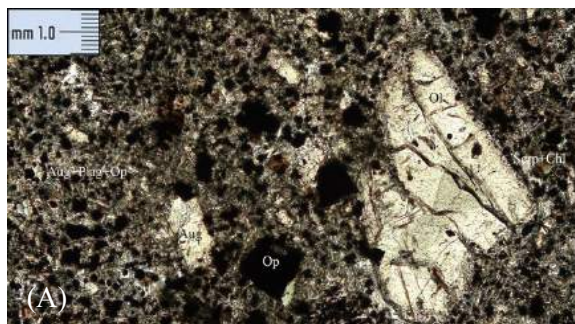
Figura B.6 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BQ

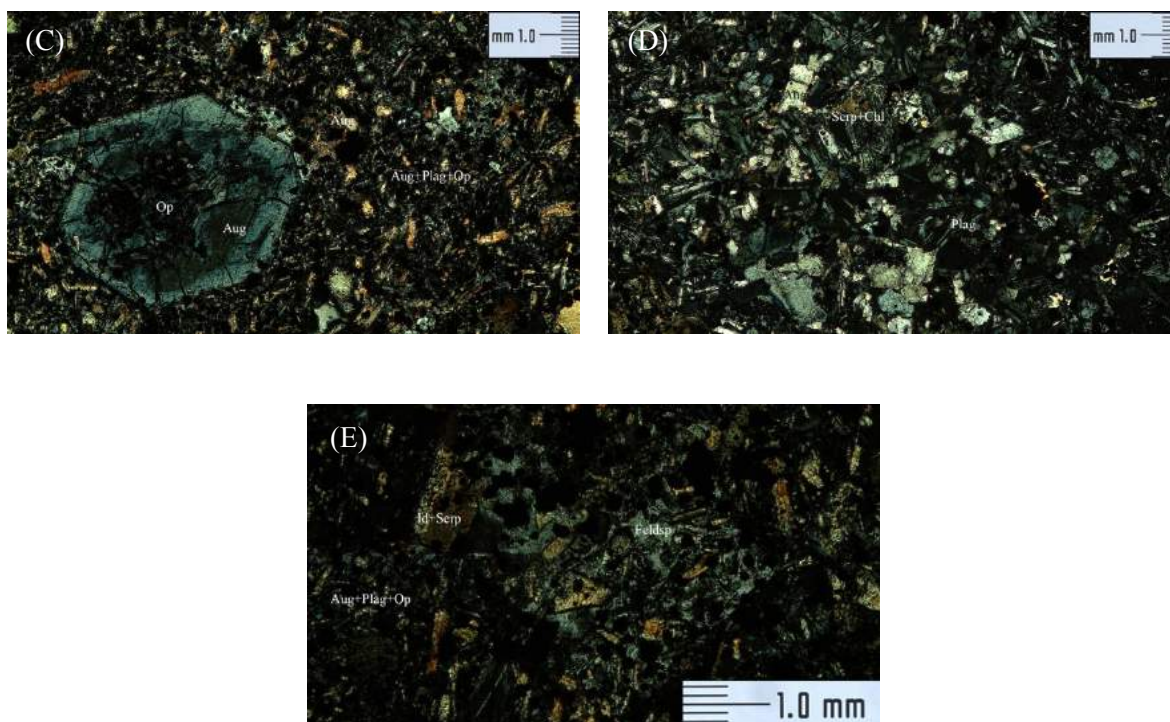
Tabela B.8 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BM

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)			
	Amostra nº.	Localização	Origem
Identificação	BM_ponto1	38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W	CVL
Descrição da amostra de mão			
Cor/Intervalo de cor	cinzenta com laivos brancos devido aos veios, melanocrata		
Textura	grau de cristalinidade	holocristalina (+90% de cristais)	
	granularidade	afanítica (cristais não resolúveis a olho nu) porfírica (geração de fenocristais em matriz microcristalina ou vítrea)	
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Difícilmente identificáveis a olho nu (apenas a calcite de preenchimento dos veios); mas infere-se serem cerca de 20%	
	Máficos	Pouco identificáveis a olho nu (apenas piroxenas - minerais pretos com brilho vítreo em secções rectangulares a quadrangulares, muitas vezes em agregados de maiores dimensões); mas infere-se serem cerca de 80%	
	Fracturas		Porosidade
Abertas	-		Reduzida mas visível à lupa
Fechadas	Sim		
Preenchidas	Sim, com calcite e provavelmente zeólitos no seu interior. Têm orientação variável, mas por norma apresentam-se verticais e a atravessar o provete		
Meteorização/ alteração	Matriz rochosa sem alteração, concentrando-se esta em torno das fissuras e veios onde se observa uma descoloração da rocha (W ₁ a W ₁₋₂)		
Presença de fósseis	-		
Presença de xenólitos	-		
Descrição microscópica			
Textura	grau de cristalinidade	Holocristalina	
	granularidade	Afanítica porfírica (matriz microcristalina a criptocristalina, havendo dificuldade na identificação dos minerais na matriz)	
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: sub-euédricos a anédricos Matriz: anédrica	
	texturas especiais	-	

Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos
		<ul style="list-style-type: none"> • Plagioclase: mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite); • Feldspatóide: mineral incolor e anédrico que apresenta tintas inferiores à plagioclase, dispondo-se intersticialmente. Pensa-se ser analcite 	<ul style="list-style-type: none"> • Olivina: mineral incolor, não pleocrórico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se totalmente alterado (serpentina e idingsite) • Augite: mineral castanho pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem observáveis nas secções basais. Apresenta-se zonada e tem tintas de birrefringência de 2ª ordem nos cristais prismáticos. Apresenta frequentemente núcleos serpentinizados e cloritizados (cor verde e com as tintas características) • Opacos: óxidos de Fe (como a magnetite) na matriz e a alterar completamente a olivina • Biotite: mineral de cor castanho que se apresenta raramente na matriz; apresenta elevadas tintas de extinção e exhibe a chamada extinção em olho de perdiz
	Secundária	<ul style="list-style-type: none"> • Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas (tintas elevadas); • Serpentina e clorite: minerais de alteração da olivina, dispondo-se em seu redor. A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas; • Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticos • Carbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefringência extrema, nunca ficando isótropo. Associado aos zeólitos 	

	fenocristais	Augite e Olivina			
	microfenocristais	Olivina			
	matriz	Plagioclase e feldspatóide			
Quantificação	volume (%)* *determinação semi-quantitativa	Primários	Secundários	Total	
		Olivina: 25%	Id: 20%	Olivina: 10% Id: 5% Serp+Chl: 10% Aug: 24% Serp+Chl: 16% Plag: 11% Feldspatóide: 2% Zeo: 12 % Carb: 3% Opacos: 5% Biotite: 2% Total(Serp+chl): 26%	
			Serp+chl: 40%		
			Não alterado:40%		
		Augite: 40%	Serp+Chl: 40%		
		Plagioclase: 23%	Zeólitos: 45% Carbonatos: 10% Não alterado: 45% Nota: difícil de observar, percentagens são inferidas		
					Não alterado: 60%
					Feldspatóide: 5%
		Opacos: 5%			
Biotite: 2%					
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Porosidade reduzida; Microcavidades com zeólito e carbonato (raro) na matriz			
	Fracturas	Raros veio com zeólitos e calcite, por vezes com alguma serpentina (difícil de identificar)			
Grau de alteração		Alteração hidrotermal das olivinas, augites e matriz; grau de alteração em termos de competência: $W_{1/2}$			
Notas		O feldspatóide pode ter uma natureza tardia tal como descrito por Palácios (1985)			
Classificação		Basalto de tendência alcalina			
Informação complementar					
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basalto	
		Hipabissal H			
		Vulcânica V			





(A) e (B) Olivina anédrica com núcleo alterado em matriz microcristalina muito fina de augite, plagioclase e opacos, // e X (x10); (C) Cristal de augite zonado, X (x10); (D) e (E) Matriz de plagioclase, augite, opacos, serpentina associada a idingsite e feldspatóide, X (x10 e x25)

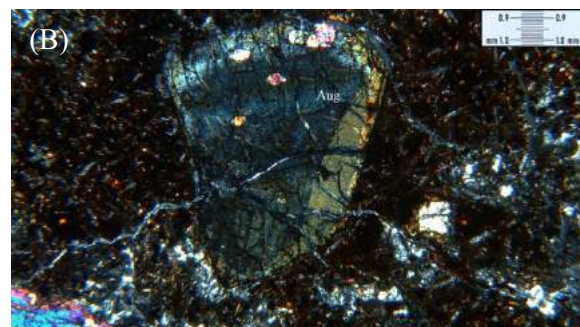
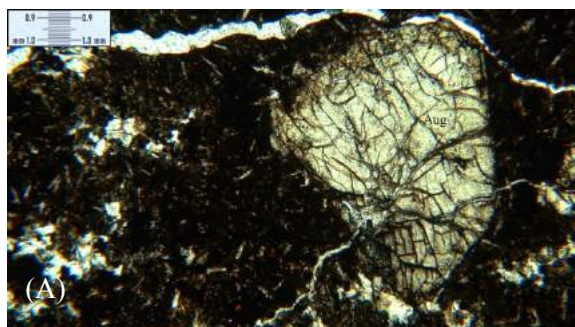
Figura B.7 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BM

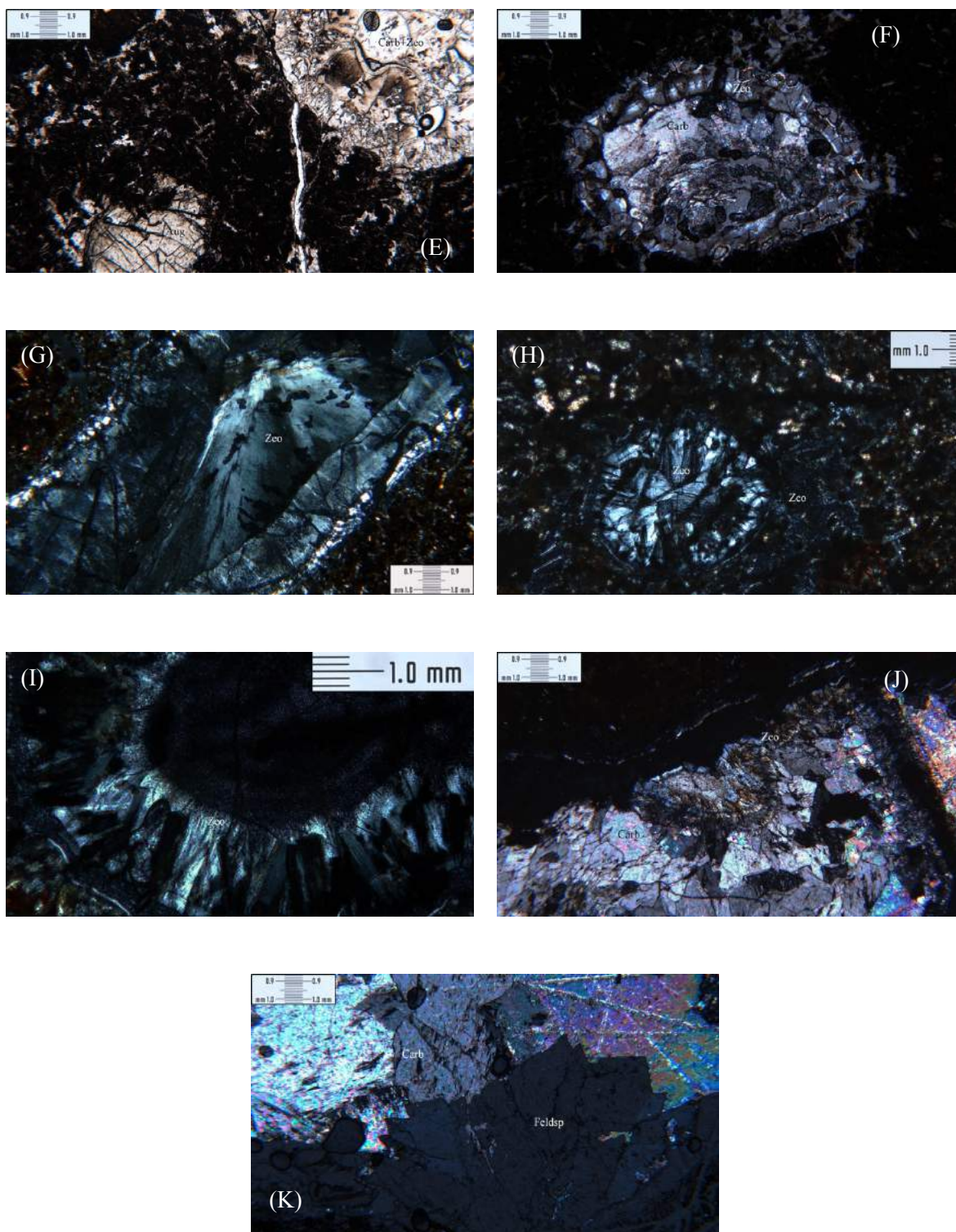
Tabela B.9 Descrição macroscópica e microscópica da amostra BA

Ficha para a descrição petrográfica de rochas ígneas (adaptado da NP EN 12407)			
	Amostra nº.	Localização	Origem
Identificação	BA	38°42'11,73"N e 9°10'25,90"W	CVL
Descrição da amostra de mão			
Cor/Intervalo de cor	Melanocrata com cor castanha avermelhada		
Textura	grau de cristalinidade	hialocristalina	
	granularidade	afanítica porfíritica com textura amigdalóide	
Mineralogia e quantificação (se possível)	Félsicos	Pouco identificáveis a olho nu (apenas a calcite de preenchimento dos veios); mas infere-se serem cerca de 20%	
	Máficos	Pouco identificáveis a olho nu; observa-se fenocristais oxidados (piroxenas ou olivinas) mas infere-se serem cerca de 80%	
	Fracturas		Porosidade
Abertas	-		Elevada
Fechadas	Sim		
Preenchidas	Sim (calcite+zeólitos); mas finas		
Cavidades	Sim, amígdalas com calcite e zeólitos		
Meteorização/ alteração	Elevada dada a cor da matriz bem como a natureza friável. Grau W ₄		
Presença de fósseis	-		
Presença de xenólitos	-		
Descrição microscópica			
Textura	grau de cristalinidade	Hialocristalina (vidro e cristais não excedem individualmente os 90%)	
	granularidade	Afanítica porfíritica (matriz criptocristalina a vítrea)	
	formas e arranjos geométricos	Fenocristais: sub-euédricos Matriz: anédrica a vítrea	
	texturas especiais	Textura em cavidade amigdaloidal (espaços existentes nas rochas preenchidos por minerais tardios ou pós-magmáticos)	
Mineralogia	Primária	Félsicos	Máficos
		<ul style="list-style-type: none">Plagioclase (+ Feldspato alcalino ?): mineral incolor com hábito tabular, baixo relevo e com macla típica (polissintética da albite); Difícil de identificar na	<ul style="list-style-type: none">Olivina: mineral incolor, não pleocróico, de relevo elevado e com hábito hexagonal alongado, apresentando-se fracturado. Tem extinção recta e apresenta-se totalmente alterado (serpentina e

		<p>matriz dada a sua natureza</p> <ul style="list-style-type: none">Feldspatóide: mineral incolor e anédrico que apresenta tintas inferiores à plagiocase, dispondo-se intersticialmente. Pensa-se ser analcite e encontra-se na matriz	<p>idingsite); em grãos médios a pequenos dispersos na matriz</p> <ul style="list-style-type: none">Augite: mineral castanho pálido, com ligeiro pleocroísmo e com relevo alto (mas inferior à olivina). Tem duas direcções de clivagem observáveis nas secções basais. Apresenta-se zonada e tem tintas de birrefragência de 2ª. ordem nos cristais prismáticos. Apresenta frequentemente núcleos serpentinizados e cloritizados (cor verde e com as tintas características)Opacos: óxidos de Fe (como a magnetite) na matriz e a alterar completamente a olivina	
	Secundária	<ul style="list-style-type: none">Idingsite: mineral de cor castanha que altera quase na totalidade a olivina. Preserva o hábito desta e por vezes algumas características ópticas (tintas elevadas);Serpentina e clorite: minerais de alteração da olivina, dispondo-se em seu redor. A sua mistura confere cor esverdeada/amarelo ocre em nicóis paralelos e uma textura esferolítica em nicóis cruzados, com baixas tintas;Zeólito: mineral tardio e que tende a preencher os espaços vazios da matriz, ocorrendo com hábito segundo agregados fibrosos radiais ou esferolíticosCarbonatos: mineral incolor e normalmente em cristais anédricos, com tintas de birrefrangência extrema, nunca ficando isótropo. Associado aos zeólitos		
	fenocristais	Augite		
	microfenocristais	Olivina		
	matriz	Plagioclase e feldspatóide		
Quantificação	volume (%)*	Primários	Secundários	Total
	*determinação semi-quantitativa	Olivina: 30%	Id: 15%	Id: 5%
			Serp: 15%	Serp: 4%
			Zeólito: 50%	Zeol:15%
			Carbonato: 20%	Carb: 6%
		Augite: 30% Nota: fenocristais; pode haver mais na matriz	Serpentina: 30% Não alterado: 70%	Aug: 21% Serp: 9% Plag: 5 % Feldsp.Alk: 0% Feldspatóide: 1% Zeol: 18%
	Plagioclase: 23%			

		Feldspato alcalino: 2%	não alterado: 20% Zeólito: 60% Carbonato:20% Nota: difícil de observar, percentagens são inferidas	Carb: 6% Opacos: 10% Total(Zeo): 33% Total(Carb): 12% Total(Serp+chl): 13%
		Feldspatóide: 5%		
		Opacos: 10%		
Descontinuidades	porosidade/ microcavidades (grau)	Porosidade considerável; Microcavidades e cavidades de dimensões significativas (amígdalas) com zeólito e carbonato		
	Fracturas	Fracturas maioritariamente preenchidas por e zólito e carbonatos, interligando as diversas amígdalas. Também microfissuras a afectar os grãos minerais, onde nas fracturas há a deposição de serpentina		
Grau de alteração		W ₄		
Notas		Provavelmente, antigos espaços com olivina foram substituídos por zeólitos e carbonatos, explicando o método de cálculo das percentagens O feldspatóide pode ter uma natureza tardia tal como descrito por Palácios (1985), bem como o feldspato alcalino		
Classificação		Basalto de tendência alcalina		
Informação complementar				
Tipo (V)		Plutónica P	QAPF	Basanita
		Hipabissal H		
		Vulcânica V		





(A), (B) e (C) Cristal de augite exibindo duas direcções de clivagem e zonado, // e X (x5); (D), (E) e (F) Amígdalas com carbonatos e zeólitos, ligadas por fracturas, observando-se a textura hialocristalina, // e X (x5); (G), (H) e (I) Cavidades preenchidas por zeólitos, X (x5, x10 e x25); (J) e (K) Carbonatos associados feldspatóide, X (x5)

Figura B.8 Secções exemplo da lâmina delgada da amostra BA

C. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

C.1 MASSA VOLÚMICA, PESO VOLÚMICO E POROSIDADE

Tabela C.1 Resultados do ensaio de peso volúmico e porosidade para a amostra BLV

Amostra: BLV							
Data de ensaio: 16 a 21/05/2018							
Instrumento de medição: balança digital com incerteza $\pm 0,01\text{g}$							
Provete		m _{sub} (g)	m _{sat} (g)	m _d (g)	ρ_a (g/cm ³)	γ (kN/m ³)	n _e (%)
Grupo	n°.						
I	1	100,43	157,52	151,94	2611	25,61	9,77
	2	162,24	247,53	243,34	2799	27,46	4,91
	3	89,86	136,22	134,33	2842	27,88	4,08
	4	56,60	86,04	84,84	2827	27,73	4,08
	5	152,92	231,61	229,32	2859	28,05	2,91
	6	164,72	248,35	246,51	2892	28,37	2,20
	7	187,60	287,65	284,32	2788	27,35	3,33
	9	136,02	208,50	206,03	2789	27,36	3,41
	12	80,60	122,28	120,75	2842	27,88	3,67
	13	190,30	290,91	286,35	2792	27,39	4,53
	14	128,82	195,55	193,27	2841	27,87	3,42
	24	122,50	191,87	188,56	2667	26,16	4,77
N°. total de provetes: 12							
II.a	1	105,29	160,37	157,68	2808	27,55	4,88
	2	60,37	92,35	90,43	2774	27,21	6,00
	3	118,47	181,25	177,37	2772	27,19	6,18
	4	162,10	246,40	243,10	2829	27,75	3,91
	6	90,23	146,71	135,75	2358	23,13	19,41
	7	116,24	178,64	173,96	2735	26,83	7,50
	8	59,52	91,77	89,27	2715	26,64	7,75
II.b	1	65,89	104,74	99,78	2520	24,72	12,77
	2	partiu	-	-	-	-	-
	3	77,43	120,41	115,67	2640	25,90	11,03
	5	101,25	158,10	148,99	2571	25,22	16,02
	6	145,96	227,48	217,68	2620	25,70	12,02
	7	91,84	149,07	140,99	2417	23,71	14,12
N°. total de provetes: 12							
95,60/154,01 (partiu)							

Tabela C.2 Resultados do ensaio de peso volúmico e porosidade para a amostra BLA

Amostra: BLA							
Data de ensaio: 21 a 25/05/2018							
Instrumento de medição: balança digital com incerteza $\pm 0,01\text{g}$							
Provete		m _{sub} (g)	m _{sat} (g)	m _d (g)	ρ_a (g/cm ³)	γ (kN/m ³)	n _e (%)
Grupo	n°.						
I	1	82,92	129,88	126,59	2644	25,94	7,01
	2	80,07	124,21	123,07	2735	26,83	2,58
	3	53,83	85,40	81,76	2541	24,92	11,53
	4	35,61	55,88	54,01	2614	25,64	9,23
	6	70,67	109,87	107,97	2702	26,51	4,85
	7	67,59	105,86	103,20	2645	25,95	6,95
	8	74,27	116,92	113,56	2612	25,62	7,88
	9	77,29	118,86	117,78	2779	27,27	2,60
	10	51,20	79,81	78,23	2682	26,31	5,52
	11	57,38	89,48	87,39	2671	26,20	6,51
	15	123,16	191,98	188,89	2693	26,41	4,49
	31	99,71	156,49	152,09	2628	25,78	7,75
Nº. total de provetes: 12							
II	1	106,36	167,71	162,04	2591	25,42	9,24
	2	83,85	131,43	127,38	2626	25,76	8,51
	4	121,59	190,71	186,12	2642	25,91	6,64
	5	84,76	132,27	129,17	2667	26,16	6,52
	7	132,72	207,43	202,46	2658	26,08	6,65
	8	111,85	174,93	170,61	2653	26,03	6,85
	9	88,29	138,86	134,01	2600	25,50	9,59
	11	119,48	188,79	182,12	2578	25,29	9,62
	13	186,29	291,50	284,06	2649	25,98	7,07
	15	85,35	133,92	129,06	2607	25,57	10,01
Nº. total de provetes: 10							

Tabela C.3 Resultados do ensaio de peso volúmico e porosidade para a amostra BQ

Amostra: BQ							
Data de ensaio: 28 a 31/05/2018							
Instrumento de medição: balança digital com incerteza $\pm 0,01\text{g}$							
Provete		m _{sub} (g)	m _{sat} (g)	m _d (g)	ρ_a (g/cm ³)	γ (kN/m ³)	n_e (%)
Grupo	n°.						
I	1	77,54	116,04	115,76	2950	28,94	0,73
	4	106,85	160,21	159,8	2938	28,82	0,77
	5	70,22	105,42	104,94	2925	28,69	1,36
	6	62,32	94,26	93,83	2882	28,27	1,35
	7	77,06	116,06	115,46	2904	28,49	1,54
	8	48,18	72,74	71,85	2870	28,15	3,62
	9	121,65	181,65	181,32	2965	29,08	0,55
	10	72,85	108,76	108,52	2965	29,08	0,67
	11	78,93	118,47	117,6	2918	28,62	2,20
	12	85,32	127,97	127,13	2924	28,69	1,97
Nº. total de provetes: 10							

Tabela C.4 Resultados do ensaio de peso volúmico e porosidade para a amostra BM

Amostra: BM							
Data de ensaio: 1 a 3/08/2018							
Instrumento de medição: balança digital com incerteza $\pm 0,01\text{g}$							
Provete		m _{sub} (g)	m _{sat} (g)	m _d (g)	ρ_a (g/cm ³)	γ (kN/m ³)	n _e (%)
Bloco	n°.						
1	1	69,60	104,40	104,06	2933,42	28,78	0,98
	2	42,07	63,40	62,62	2879,99	28,25	3,66
2	3	189,65	285,13	283,16	2909,30	28,54	2,06
	4	44,34	67,00	66,48	2878,06	28,23	2,29
	5	34,89	52,41	52,10	2917,24	28,62	1,77
	6	47,70	72,10	70,91	2850,93	27,97	4,88
	7	108,21	162,22	161,43	2932,10	28,76	1,46
	8	128,73	192,89	191,63	2930,00	28,74	1,96
4	9	38,71	58,52	58,23	2883,58	28,29	1,46
	10	138,60	207,84	207,22	2935,92	28,80	0,90

Nº. total de provetes: 10

Tabela C.5 Resultados do ensaio de peso volúmico e porosidade para a amostra BA

Amostra: BA							
Data de ensaio: 23 a 25/05/2018 e 4 a 6/06/2018							
Instrumento de medição: balança digital com incerteza $\pm 0,01\text{g}$							
Provete		m _{sub} (g)	m _{sat} (g)	m _d (g)	ρ_a (g/cm ³)	γ (kN/m ³)	n _e (%)
Bloco	nº.						
1	1	245,98	416,74	380,65	2187	21,45	21,13
	2	229,79	388,92	353,15	2177	21,36	22,48
2	3	410,05	658,65	625,64	2469	24,22	13,28
	4	279,57	442,76	421,90	2536	24,88	12,78
3	5	246,93	424,95	383,02	2111	20,71	23,55
	6	309,65	539,99	483,99	2061	20,22	24,31
4	7	202,32	342,45	314,08	2199	21,57	20,25
5	8	166,38	276,70	256,47	2281	22,37	18,34
6	9	184,27	312,12	285,77*	2193	21,51	20,61
	10	213,03	354,76	334,25	2314	22,70	14,47
7	11	315,10	515,64	479,51	2346	23,01	18,02
8	12	143,99	228,41	215,90	2509	24,61	14,82
	13	265,45	420,75	399,94	2526	24,78	13,40
9	14	130,57	227,49	200,77	2032	19,94	27,57

Nº. total de provetes: 14
*fractura

C.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

Tabela C.6 Resultados obtidos para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons para a amostra BLV

Amostra: BLV													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Data de ensaio: 14/05/2018 a 16/05/2018													
Equipamento: proceq pundit lab e PUNDIT													
Provete		L médio (mm)	L(v _s) (mm)	T _p médio (μs)	v _p (m/s)	T _s (μs)			T _s médio (μs)	v _s (m/s)	ρ (g/cm ³)	v _d	E _d (GPa)
Grupo	nº.												
I	1	176	160	36,6	4806	74,6	59,2	67,7	67,2	2382	2611	0,29	39,62
	3	179	163	33,9	5280	67,6	46	44,8	52,8	3087	2842	0,19	67,19
	4	181	165	34,9	5186	59,4	54,7	56,5	56,9	2902	2827	0,22	60,56
	5	180	164	35,9	5014	69,4	65,7	73,2	69,4	2362	2859	0,31	43,30
	6	181	165	32,9	5502	54,7	58,6	60,4	57,9	2850	2892	0,27	61,85
	7	181	165	36,6	4965	66,6	76,4	60,3	67,8	2435	2788	0,29	44,35
Nº. total de provetes: 6													
Nota: BLVI.1 aparenta melhor qualidade (fracturação afecta os resultados), ao contrário de BLVI.6, onde se esperava menores valores de v _p													
II.a	1	176	160	36,4	4835	67,3	64,4	57,2	63,0	2541	2808	0,26	47,47
	3	177	161	35,2	5028	62,3	55,7	55,3	57,8	2787	2772	0,23	55,05
	4	178	162	38,6	4576	63,6	66,1	57,4	62,4	2598	2829	0,21	48,19
II.b	1	169	153	123,7	1366	213,9	144,5	210,5	189,6	807	2520	0,18	4,04
	2	179	163	86,1	2079	201,3	186,1	179,4	188,9	863	2553	0,36	5,31
	3	176	160	67,9	2591	91,2	153,2	182,4	142,3	1125	2640	0,34	9,24
Nº. total de provetes: 6													
Nota: diferenças na matriz rochosa (mais porosa e mais alterada) contribui para a quebra dos valores													

Tabela C.7 Resultados obtidos para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons para a amostra BLA

Amostra: BLA													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Data de ensaio: 15/05/2018 a 16/05/2018													
Equipamento: proceq pundit lab e PUNDIT													
Provete		L médio (mm)	L(v _s) (mm)	T _p médio (μs)	v _p (m/s)	T _s (μs)			T _s médio (μs)	v _s (m/s)	ρ (g/cm ³)	v _d	E _d (GPa)
Grupo	n°.												
I	1	156	140	28,2	5532	34,6	45,5	40,8	40,3	3474	2644	0,13	74,95
	2	158	142	29,9	5284	39,7	48,3	43,6	43,9	3237	2735	0,15	68,76
	3	156	140	37,6	4116	57,6	59,5	59,7	58,9	2376	2541	0,20	35,86
	4	159	143	31,7	5016	52,1	40,5	53,4	48,7	2938	2614	0,19	55,92
	5	156	140	32,6	4602	58	52,6	48,8	53,1	2635	2614	0,21	45,59
	6	152	136	34,7	4380	55,6	50,4	58,5	54,8	2480	2702	0,21	42,02
	7	152	136	33,9	4484	51,3	55,4	56,6	54,4	2498	2645	0,22	42,10
	8	151	135	30,4	4967	50,3	51,7	43,8	48,6	2778	2612	0,22	51,29
	9	152	136	32,1	4735	45,8	48,9	42,3	45,7	2978	2779	0,13	57,81
	10	153	137	35,2	4347	59,2	57,8	60	59,0	2322	2682	0,25	37,61
	11	155	139	33,1	4622	59,5	54,4	51,8	55,2	2517	2671	0,24	43,62
Nº. total de provetes: 11													
Nota: grau de fracturação muito variável o que gera esta diferença de valores													

Tabela C.8 Resultados obtidos para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons para a amostra BQ

Amostra: BQ													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Data de ensaio: 14/05/2018 a 16/05/2018													
Equipamento: proceq pundit lab e PUNDIT													
Provete		L médio (mm)	L(v _s) (mm)	T _p (μs)	v _p (m/s)	T _s			T _s médio (μs)	v _s (m/s)	ρ (g/cm³)	v _d	E _d (GPa)
Bloco	nº.												
1	2	150	134	25,2	5952	37,4	38,3	40,7	38,8	3454	2950	0,20	87,70
2	4	147	131	23,9	6192	36,7	35,6	35,3	35,9	3652	2938	0,18	96,67
	5	148	132	24,4	6066	38,1	42,6	37,9	39,5	3339	2925	0,23	83,65
3	6	148	132	23,7	6245	34,6	38,4	35,1	36,0	3663	2882	0,19	95,74
5	7	145	129	28,1	5460	42,1	43,2	43,3	42,9	3009	2904	0,23	67,42
	8	149	133	25,9	5753	39,5	39,4	38,1	39,0	3410	2870	0,18	82,05
Nº. total de provetes: 6													
* face não tão plana pode gerar mau contacto entre transdutores													

Tabela C.9 Resultados obtidos para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons para a amostra BA

Amostra: BA																
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório																
Data de ensaio: 5/06/2018																
Equipamento: PUNDIT																
Provete		L _{médio} (mm)	L(v _s) (mm)	T _p (μs)			T _p médio (μs)	V _p médio (m/s)	T _s (μs)			T _s médio (μs)	v _s (m/s)	ρ (g/cm³)	v _d	E _d (GPa)
Bloco	nº															
S14 de BLV	1*	217	201	-	-	-	-	-	416,8	313,7	314,8	348,4	577	-	-	-
	2*	222	206	238,6	270,8	266,5	258,6	858	478,8	513,4	485,6	459,3	449	-	-	-
2	3	160	144	233,4	176,5	169,9	159,9	1000	149,4	151,4	146,3	304,2	473	2469	-0,25	1,50
4	4	231	215	104,4	187,7	127,2	139,8	1653	353,8	330,6	283,8	307,2	700	2536	-0,20	3,46
9	5	209	193	148,6	162,3	195,5	168,8	1238	394,8	334,0	440,2	389,7	495	2111	-0,17	1,45
	6	216	200	170,4	204,7	150,9	175,3	1232	359,3	366,0	260,7	328,7	609	2061	-0,28	2,04
Nº. total de provetes: 6																

C.3 DUREZA AO RESSALTO

C.3.1 BQ

Tabela C.10 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BQ1

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BQ1	Localização: Queijas - 38°42'43"N; 9°15'54,29"W	1	67	11	57
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	64	12	56
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	63	13	56
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 18/04/2018	4	63	14	55
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	62	15	55
Forma: irregular (algumas superfícies aplanadas)	Tamanho: 51x 26 x 19 cm ³	6	61	16	55
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	61	17	55
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	59	18	54
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante sobre chão liso	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	59	19	54
		10	57	20	53
Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não apresenta fendas nem fissuras nas suas faces expostas e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		67	
		Mínimo		53	
		Média		58	
		Moda		55	
		Mediana		56,5	
		Q1		55	
		Q3		61,75	
		IQR (Q3-Q1)		6,75	
		Desvio padrão		3,9	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,07	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			





			
Antes		Depois	
Outliers			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$, $R(1) = 2,209$ exclui-se o valor máximo Para $n = 20$, $R(2) = 1,914$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[34,75; 44,875]	0	Não se identifica nenhum valor anômalo por este método
	[71,875; 82]	0	
Estatísticos univariados sem outliers			
	Máximo	64	
	Mínimo	53	
	Média	58	
	Moda	55	
	Mediana	57	
	Q1	55	
	Q3	61	
	IQR (Q3-Q1)	6	
	Desvio padrão	3,4	
	Coefficiente de variação (σ/m)	0,06	

Tabela C.11 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BQ2

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BQ2	Localização: Queijas - 38°42'43"N; 9°15'54,29"W	1	59	11	52
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	58	12	52
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	58	13	51
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 18/04/2018	4	57	14	49
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	57	15	47
Forma: irregular (algumas superfícies aplanadas)	Tamanho: 24 x 22 x 16 cm ³	6	55	16	46
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	55	17	45
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	55	18	44
Método de fixação: peso próprio em superfície lisa e plana, com o auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	54	19	44
		10	53	20	43
<p>Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima</p>		Máximo		59	
		Mínimo		43	
		Média		52	
		Moda		55	
		Mediana		53,5	
		Q1		47,25	
		Q3		56,5	
		IQR (Q3-Q1)		9,25	
		Desvio-padrão		5,0	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,10	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			





Antes



Depois

<i>Outliers</i>			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[19,5; 33,375]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[70,375; 84,25]	0	

Tabela C.12 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BQ3

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BQ3	Localização: Queijas - 38°42'43"N; 9°15'54,29"W	1	48	11	30
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	46	12	30
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	44	13	30
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 20/04/2018	4	40	14	27
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	39	15	26
Forma: irregular (algumas superfícies aplanadas)	Tamanho: 16 x 18 x 18 cm ³	6	39	16	26
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	38	17	25
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 22°	8	36	18	23
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com o auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	34	19	22
		10	34	20	21
<p>Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima</p>		Máximo		48	
		Mínimo		21	
		Média		33	
		Moda		30	
		Mediana		32	
		Q1		26	
		Q3		39	
		IQR (Q3-Q1)		13	
		Desvio padrão		7,9	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,24	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0º e por ordem decrescente			
<div>Antes</div> 				<div>Depois</div>	

<i>Outliers</i>			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[-13; 6,5]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[58,5; 78]	0	

Tabela C.13 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BQ4

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BQ4	Localização: Queijas - 38°42'43"N; 9°15'54,29"W	1	48	11	31
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	38	12	28
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	35	13	28
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 20/04/2018	4	35	14	28
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	35	15	28
Forma: irregular com superfície de ensaio aplanada	Tamanho: 24 x 17 x 19 cm ³	6	35	16	27
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	34	17	26
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 22°	8	32	18	25
Método de fixação: peso próprio sobre saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com o auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	32	19	23
		10	32	20	23
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		48	
		Mínimo		23	
		Média		31	
		Moda		35	
		Mediana		31,5	
		Q1		27,25	
		Q3		35	
		IQR (Q3-Q1)		7,75	
		Desvio padrão		5,9	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,18	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			



			
Antes		Depois	
Outliers			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ rejeita-se o valor máximo (resultado superior ao p-value)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ exclui-se o valor máximo Para $n = 20$ e $R(2) = 1,914$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[4; 15,625]	0	Valor máximo identificado como valor anômalo
	[46,625; 58,25]	1	
Estatísticos univariados sem outliers			
	Máximo	38	
	Mínimo	23	
	Média	30	
	Moda	35	
	Mediana	31	
	Q1	27	
	Q3	35	
	IQR (Q3-Q1)	8	
	Desvio padrão	4,3	
	Coefficiente de variação (σ/m)	0,14	

Tabela C.14 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BQ5

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BQ5	Localização: Queijas - 38°42'43"N; 9°15'54,29"W	1	44	11	28
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	44	12	28
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	40	13	28
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 20/04/2018	4	40	14	28
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	38	15	28
Forma: irregular, com superfície de ensaio aplanada mas com diversas irregularidades	Tamanho: 30 x 23 x 19 cm ³	6	34	16	26
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	33	17	26
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 22°	8	32	18	25
Método de fixação: peso próprio sobre saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com o auxílio de calços e blocos para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	30	19	21
		10	30	20	19
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		44	
		Mínimo		19	
		Média		31	
		Moda		28	
		Mediana		29	
		Q1		26,5	
		Q3		37	
		IQR (Q3-Q1)		10,5	
		Desvio padrão		6,9	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,22	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			

Matriz de histogramas da amostra BQ

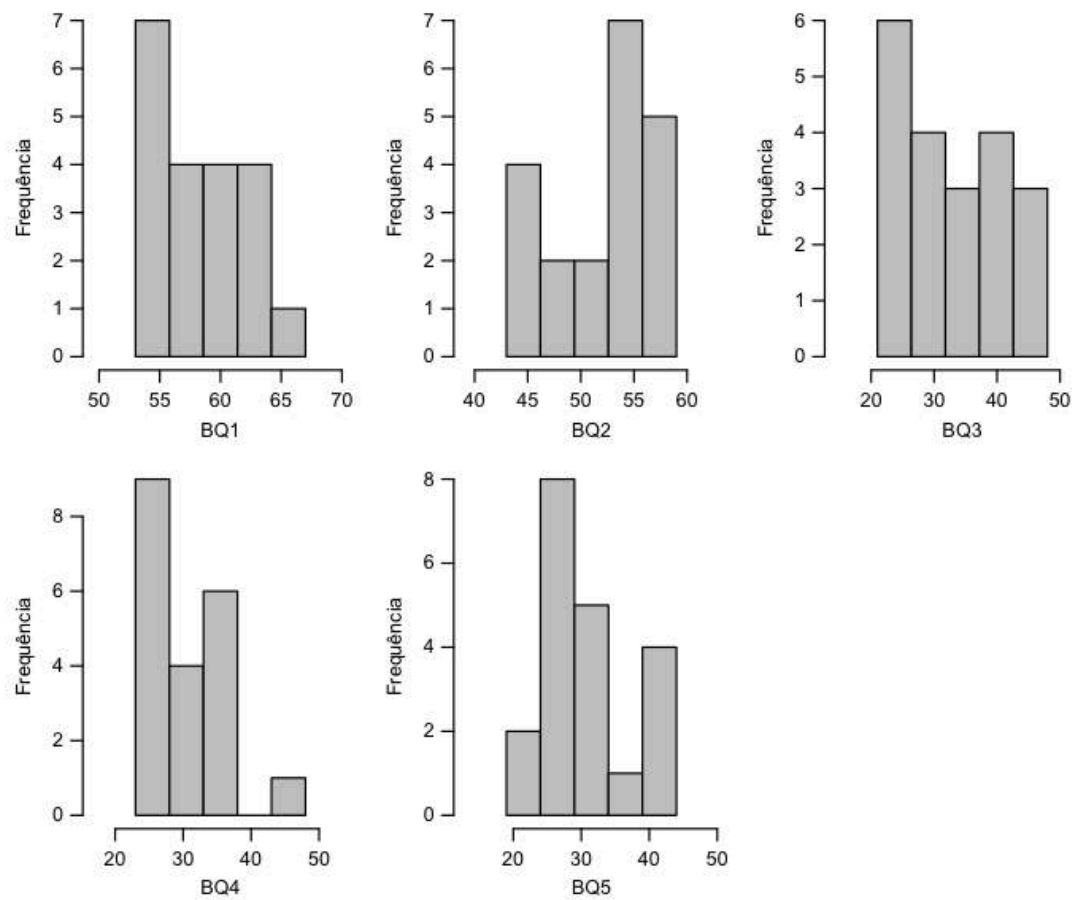


Figura C.1 Matriz de histogramas de dureza ao ressaltos dos blocos da amostra BQ

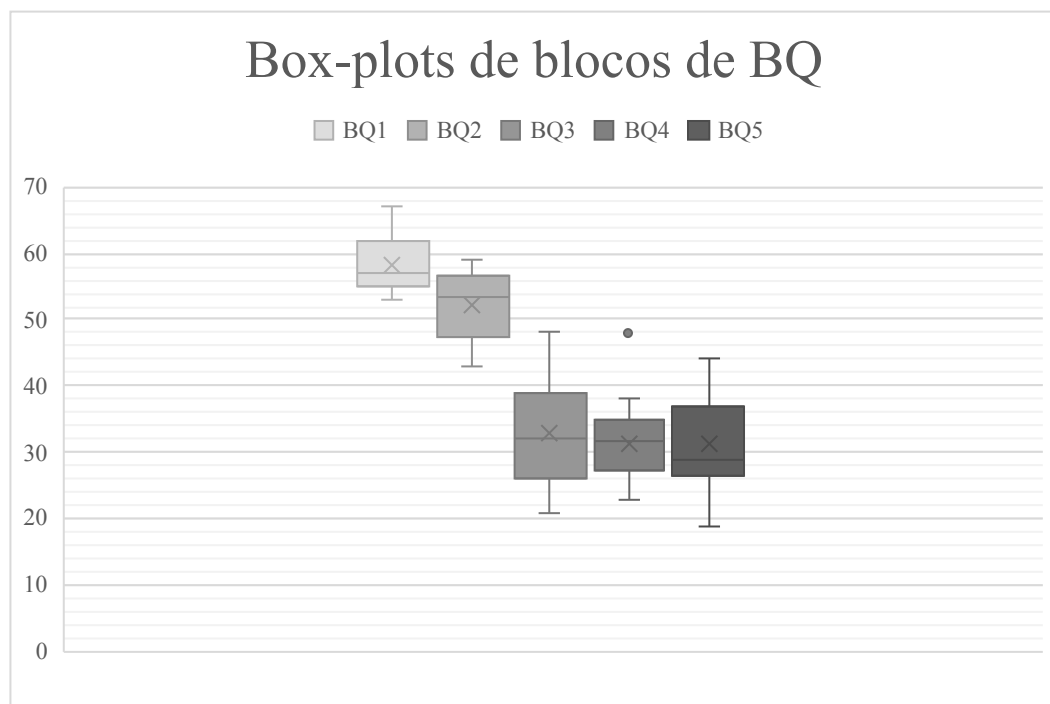


Figura C.2 Box-plots de dureza ao ressaltos dos blocos da amostra BQ

C.3.2 BM

Tabela C.15 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao resalto no bloco BM1 retirado da localização 1

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto1_1	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W	1	58	11	46
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	54	12	46
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	52	13	44
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 26/04/2018	4	52	14	44
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	49	15	44
Forma: irregular, com superfície de ensaio aplanada mas com diversas irregularidades	Tamanho: 36 x 11 x 12 cm ³	6	48	16	42
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	48	17	40
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	48	18	38
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	48	19	36
		10	48	20	34
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		58	
		Mínimo		34	
		Média		46	
		Moda		48	
		Mediana		47	
		Q1		42,5	
		Q3		48,75	
		IQR (Q1-Q3)		6,25	
		Desvio padrão		5,8	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,12	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			

Tabela C.16 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BM2 retirado da localização 1

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto1_2	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W	1	68	11	55
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	66	12	55
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	63	13	54
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 26/04/2018	4	59	14	53
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	59	15	52
Forma: irregular, com superfície de ensaio aplanada mas com diversas irregularidades	Tamanho: 36 x 11 x 12 cm ³	6	59	16	52
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	59	17	46
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	57	18	46
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	56	19	46
		10	55	20	40
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras na superfície de ensaio, porém, 6 cm abaixo desta existe uma fractura visível e em todo o seu comprimento que contribui para a heterogeneidade da rocha. Esta apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		68	
		Mínimo		40	
		Média		55	
		Moda		59	
		Mediana		55	
		Q1		52	
		Q3		59	
		IQR (Q3-Q1)		7	
		Desvio padrão		6,8	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,11	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0º e por ordem decrescente			



Outliers			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ exclui-se o valor mínimo Para $n = 20$ e $R(2) = 1,914$ exclui-se o valor máximo Para $n = 20$ e $R(3) = 1,732$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[31; 41,5]	1	Valor mínimo identificado como valor anômalo
	[69,5; 80]	0	
Estatísticos univariados sem <i>outliers</i>			
Critério de Peirce		Critério de IQR	
Máximo	66	Máximo	68
Mínimo	46	Mínimo	46
Média	55	Média	56
Moda	59	Moda	59
Mediana	55	Mediana	55
Q1	52	Q1	52
Q3	59	Q3	59
IQR (Q3-Q1)	7	IQR (Q3-Q1)	7
Desvio padrão	5,4	Desvio padrão	6,0
Coeficiente de variação (σ/m)	0,10	Coeficiente de variação (σ/m)	0,11

Tabela C.17 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BM3 retirado da localização 1

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto1_3	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'22,56"N e 9°10'54,59"W	1	51	11	39
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	48	12	38
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	48	13	38
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 26/04/2018	4	46	14	38
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	46	15	36
Forma: irregular, com superfície de ensaio com um ligeiro desnível	Tamanho: 26 x 15 x 35 cm ³	6	44	16	36
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	44	17	35
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	42	18	34
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	42	19	34
		10	42	20	28
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras, exceptuando no pequeno desnível na superfície de ensaio. Existem também vacúolos. O martelo foi usado nas zonas livres. O bloco apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		51	
		Mínimo		28	
		Média		40	
		Moda		42	
		Mediana		40,5	
		Q1		36	
		Q3		45,5	
		IQR (Q3-Q1)		9,5	
		Desvio padrão		5,7	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,14	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			



			
Antes	Depois		
Outliers			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao p -value em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[6,75; 24,375]	0	Não se identifica nenhum valor anômalo por este método
	[71,375; 89]	0	

Tabela C.18 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BM1 retirado da localização 2

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto2_1	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'17,14"N e 9°11'8,68"W	1	64	11	50
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	60	12	46
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	59	13	46
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 27/04/2018	4	58	14	44
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	54	15	42
Forma: irregular, com superfície de ensaio aplanada mas com diversas irregularidades	Tamanho: 30 x 25 x 15 cm ³	6	53	16	42
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	52	17	40
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	52	18	38
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	50	19	38
		10	50	20	37
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras, verificando-se um desnível na superfície de ensaio. Ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		64	
		Mínimo		37	
		Média		49	
		Moda		50	
		Mediana		50	
		Q1		42	
		Q3		53,75	
		IQR (Q3-Q1)		11,75	
		Desvio padrão		7,7	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,16	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0º e por ordem decrescente			



Outliers			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao $p\text{-value}$ em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[6,75; 24,375]	0	Não se identifica nenhum valor anômalo por este método
	[71,375; 89]	0	

Tabela C.19 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BM2 retirado da localização 2

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto2_2	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'17,14"N e 9°11'8,68"W	1	59	11	46
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	57	12	46
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	55	13	44
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 27/04/2018	4	54	14	44
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	54	15	42
Forma: irregular com faces relativamente aplanadas	Tamanho: 38 x 22 x 17 cm ³	6	50	16	42
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	50	17	42
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	49	18	42
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com auxílio de calços para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	49	19	40
		10	46	20	40
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e a superfície de ensaio tem diversos desníveis. Apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		59	
		Mínimo		40	
		Média		48	
		Moda		42	
		Mediana		46	
		Q1		42	
		Q3		53	
		IQR (Q3-Q1)		11	
		Desvio padrão		5,7	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,12	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0º e por ordem decrescente			



Antes			Depois
<i>Outliers</i>			
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[9; 25,5]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[69,5; 86]	0	

Tabela C.20 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BM3 retirado da localização 2

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BM_ponto2_3	Localização: Parque florestal Monsanto - 38°44'17,14"N e 9°11'8,68"W	1	55	11	48
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	55	12	48
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	54	13	46
Data de amostragem: 9/04/2018	Data de ensaio: 27/04/2018	4	54	14	45
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: natural	5	53	15	44
Forma: irregular com faces relativamente aplanadas	Tamanho: 23 x 21 x 26 cm ³	6	52	16	44
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca	7	50	17	43
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	50	18	42
Método de fixação: peso próprio sobre um saco anti-derrapante em superfície lisa e plana, com auxílio de calços e blocos para a amostra não se movimentar	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	49	19	38
		10	49	20	36
Descrição litológica: amostra rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O bloco não contém fendas nem fissuras e a superfície de ensaio tem diversos desníveis. Apresenta-se com uma ligeira descoloração, conferindo-lhe o grau de alteração referido em cima		Máximo		55	
		Mínimo		36	
		Média		48	
		Moda		55	
		Mediana		48,5	
		Q1		44	
		Q3		52,75	
		IQR (Q3-Q1)		8,75	
		Desvio padrão		5,3	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,11	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			



Antes



Depois

Outliers

Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[17,25; 30,875]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[65,875; 79]	0	

Matriz de histogramas da amostra BQ

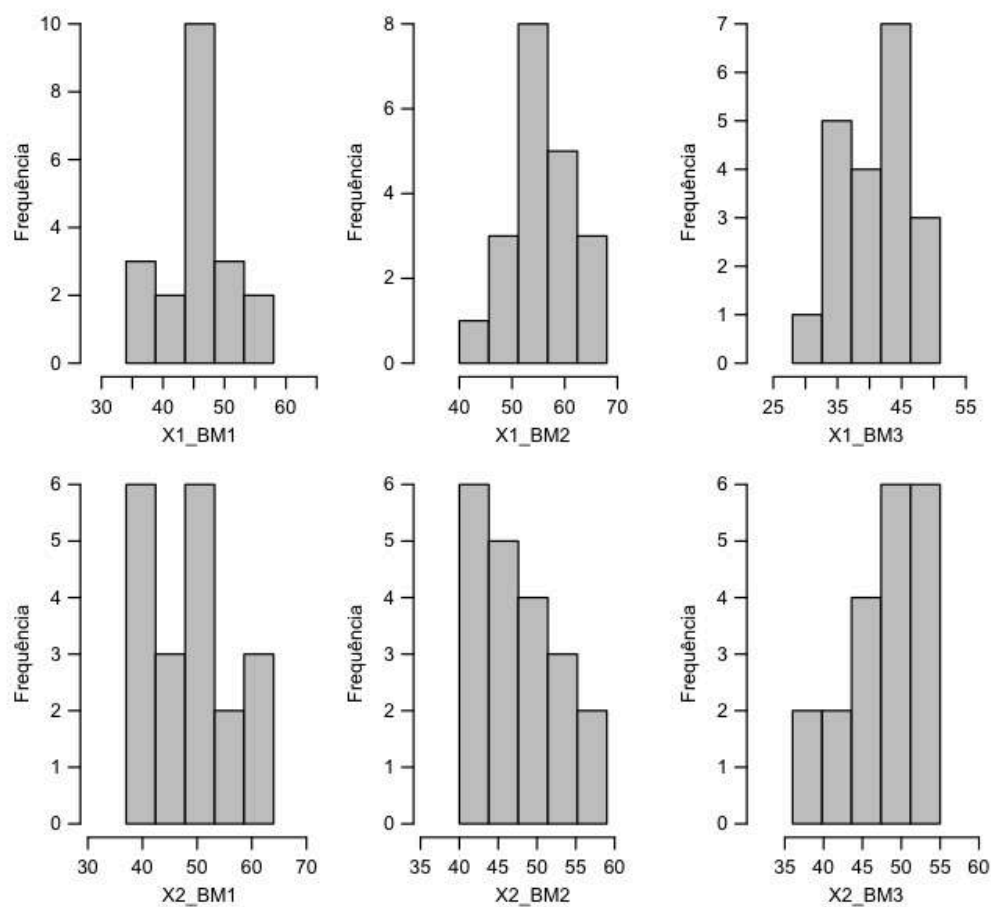


Figura C.3 Matriz de histogramas de dureza ao ressaltos dos blocos da amostra BM

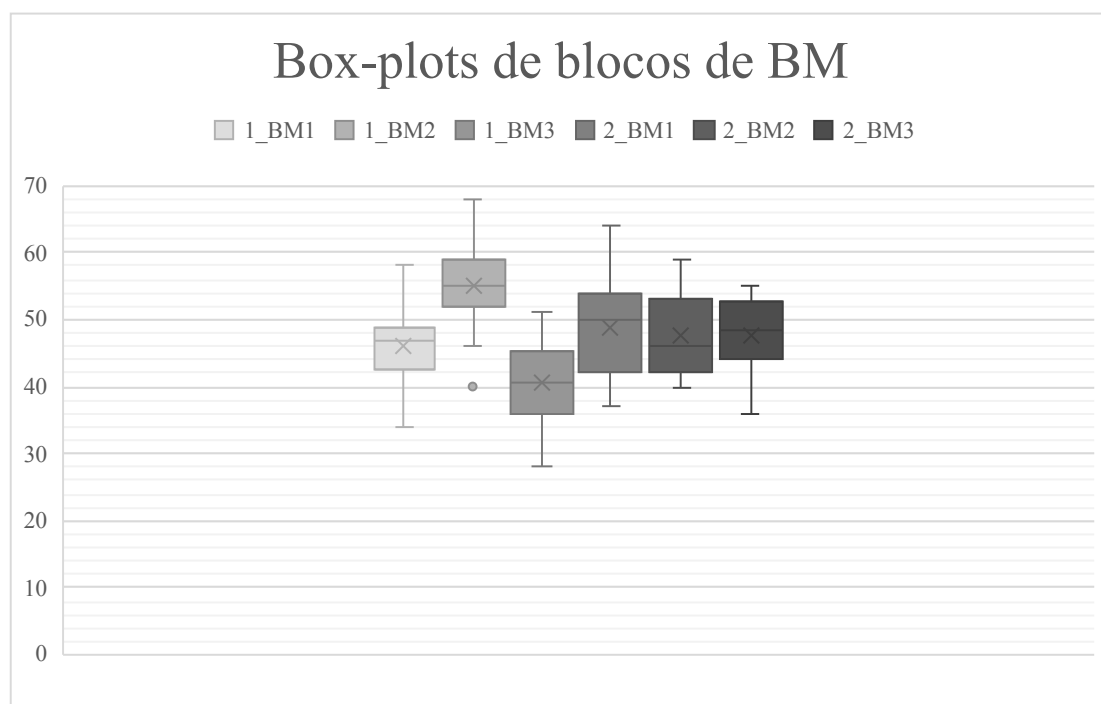


Figura C.4 Box-plots de dureza ao ressaltos dos blocos da amostra BM

C.3.3 BA

Tabela C.21 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao resalto no bloco BA2

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*		Ensaio	R*	
			A	B		A	B
Identificação da amostra: BA2	Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	1	36	36	11	26	28
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	33	36	12	24	27
Litologia: Rocha piroclástica (tufo de lapilli brechóide lítico com veios e amígdalas preenchidas por calcite e zeólitos)	Estado de alteração: W ₄	3	33	34	13	24	27
Data de amostragem: 18/10/2017	Data de ensaio: 16/05/2018	4	32	32	14	23	26
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: escavação mecânica e posteriormente serra	5		32	15	23	25
Forma: prisma irregular, com faces paralelas e lisas	Tamanho: 22 x 13 x 16 cm ³	6	32	30	16	22	24
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seco ao ar do laboratório	7	30	28	17	18	20
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	30	28	18	17	18
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante e pesos laterais para impedir movimentação do bloco	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	29	28	19	14	18
		10	28	28	20	12	18
* Descrição litológica: Basalto amigdalóide com estado de alteração é W ₄ , podendo existir núcleos mais oxidados. É melanocrata com cor acastanhada, o que demonstra essa meteorização significativa. Apresenta uma textura hialocristalina com matriz afírica, sendo um basalto		Máximo			36		36
		Mínimo			17		20
		Média			27		29
		Moda			33		28
		Mediana			27		28
		Q1			22,75		26,5
		Q3			32		32

IQR (Q3-Q1)	9,25	5,5
Desvio-padrão	5,7	4,2
Coeficiente de variação (σ/m)	0,21	0,14
* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente; * rocha fragmentou		

<p>Face A</p> 	<p>Face B</p> 
--------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------

Outliers	Face A			Face B		
Critério de Chauvenet	Para $n = 18$ e $p=2,20$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao p -value em valor absoluto)			Para $n = 17$ e $p=2,18$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao p -value em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 18$ e $R(1) = 2,161$ não se exclui nenhum valor limite			Para $n = 17$ e $R(1) = 2,134$ exclui-se o valor mínimo Para $n = 17$ e $R(2) = 1,836$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (outliers de 1ª espécie)	[-5; 8,875]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método	[10; 18,25]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[45,875; 59,75]	0		[40,25; 48,5]	0	

Estatísticos univariados sem <i>outliers</i> para a Face B		
	Máximo	36
	Mínimo	24
	Média	29
	Moda	28
	Mediana	27
	Q1	28
	Q3	32
	IQR (Q3-Q1)	5
	Desvio padrão	3,6
	Coeficiente de variação (σ/m)	0,12

Tabela C.22 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BA3

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BA3	Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	1	31	11	24
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	31	12	24
Litologia: Rocha piroclástica (tufo de lapilli brechóide lítico com veios e amígdalas preenchidas por calcite e zeólitos)	Estado de alteração: W ₄	3	30	13	22
Data de amostragem: 18/10/2017	Data de ensaio: 16/05/2018	4	29	14	21
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: escavação mecânica e posteriormente serra	5	29	15	20
Forma: prisma irregular, com faces paralelas e lisas	Tamanho: 21 x 16 x 20 cm ³	6	28	16	19
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seco ao ar do laboratório	7	28	17	18
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	26	18	18
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante e pesos laterais para impedir movimentação do bloco	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	26	19	12
		10	26	20	10
Descrição litológica: Basalto amigdalóide com estado de alteração é W ₄ , podendo existir núcleos mais oxidados. É melanocrata com cor acastanhada, o que demonstra essa meteorização significativa. Apresenta uma textura hialocristalina com matriz afírica, sendo um basalto		Máximo		31	
		Mínimo		18	
		Média		25	
		Moda		26	
		Mediana		26	
		Q1		20,75	
		Q3		29	
		IQR (Q3-Q1)		8,25	
		Desvio padrão		4,3	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,17	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			
		* rocha fragmentou			
Antes		Depois			



Outliers

Critério de Chauvenet	Para $n = 18$ e $p=2,20$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 18$ e $R(1) = 2,161$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (outliers de 1ª espécie)	$[-4; 8,375]$	0	Não se identifica nenhum valor anômalo por este método
	$[41,375; 53,75]$	0	

Tabela C.23 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BA4

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BA4	Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	1	26	11	20
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	26	12	20
Litologia: Rocha piroclástica (tufo de lapilli brechóide lítico com veios e amígdalas preenchidas por calcite e zeólitos)	Estado de alteração: W ₄	3	24	13	20
Data de amostragem: 18/10/2017	Data de ensaio: 18/05/2018	4	24	14	19
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: escavação mecânica e posteriormente serra	5	24	15	19
Forma: prisma irregular, com faces paralelas e lisas	Tamanho: 28 x 16 x 18 cm ³	6	24	16	18
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seco ao ar do laboratório	7	23	17	17
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°)	Temperatura do local de ensaio: 24°	8	22	18	16
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante e pesos laterais para impedir movimentação do bloco	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	22	19	16
		10	21	20	15
Descrição litológica: Basalto amigdalóide e anastamosado com estado de alteração é W ₄ , podendo existir núcleos mais oxidados. É melanocrata com cor acastanhada, o que demonstra essa meteorização significativa. Apresenta uma textura hialocristalina com matriz afírica, sendo um basalto		Máximo		26	
		Mínimo		16	
		Média		21	
		Moda		24	
		Mediana		21	
		Q1		19	
		Q3		24	
		IQR(Q3-Q1)		5	
		Desvio padrão		3,1	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,14	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			
		* rocha fragmentou			



(antes e depois)

Outliers

Critério de Chauvenet	Para $n = 19$ e $p=2,22$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 19$ e $R(1) = 2,185$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[4; 11,5]	0	Não se identifica nenhum valor anômalo por este método
	[31,5; 39]	0	

Tabela C.24 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BA5



Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*		Ensaio	R*	
			A	B		A	B
Identificação da amostra: BA5	Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	1	34	36	11	28	26
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	33	32	12	26	26
Litologia: Rocha piroclástica (tufo de lapilli/brecha vulcânica lítica com veios e amígdalas preenchidas por calcite e zeólitos)	Estado de alteração: W ₄	3	32	32	13	26	26
Data de amostragem: 18/10/2017	Data de ensaio: 18/04/2018	4	32	31	14	25	25
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: escavação mecânica e posteriormente serra	5	31	31	15	25	24
Forma: prisma irregular, com faces paralelas e lisas	Tamanho: 18 x 14 x 6 cm3	6	31	30	16	24	23
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seco	7	30	29	17	23	23
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	29	29	18	21	21
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante e pesos laterais para impedir movimentação do bloco	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	29	28	19	19	21
		10	28	26	20	19	17
* Descrição litológica: Basalto anastamosado com estado de alteração é W ₄ , podendo existir núcleos mais oxidados. É melanocrata com cor acastanhada, o que demonstra essa meteorização significativa. Apresenta uma textura hialocristalina com matriz afírica, sendo um basalto		Máximo			34		36
		Mínimo			21		21
		Média			28		27
		Moda			32		26
		Mediana			28,5		26
		Q1			25		24
		Q3			31,25		31
		IQR(Q3-Q1)			6,25		7

	Desvio-padrão	3,6	4,0
	Coeficiente de variação (σ/m)	0,13	0,15
	* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente; * rocha fragmentou		
 <p>Face A</p>	 <p>Face B</p>		

Outliers	Face A			Face B		
Critério de Chauvenet	Para $n = 18$ e $p=2,20$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao p -value em valor absoluto)			Para $n = 19$ e $p=2,20$ não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao p -value em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 18$ e $R(1) = 2,161$ não se exclui nenhum valor limite			Para $n = 19$ e $R(1) = 2,185$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (outliers de 1ª espécie)	[6,25; 15,625]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método	[10; 18,25]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[40,625; 50]	0		[40,25; 48,5]	0	

Tabela C.25 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto no bloco BA6

Origem das amostras: CVL		Ensaio	R*		Ensaio	R*	
			A	B		A	B
Identificação da amostra: BA6	Localização: 38°42'11,73"N; 9°10'25,90"W	1	38	38	11	32	32
Profundidade: bloco superficial	Orientação: bloco solto	2	36	36	12	32	32
Litologia: Rocha piroclástica (tufo de lapilli/brecha vulcânica lítica com veios e amígdalas preenchidas por calcite e zeólitos)	Estado de alteração: W ₄	3	36	36	13	32	29
Data de amostragem: 18/10/2017	Data de ensaio: 18/04/2018	4	36	36	14	30	29
Tipo de amostra: bloco	Método de corte da superfície: escavação mecânica e posteriormente serra	5	34	36	15	30	29
Forma: prisma irregular, com faces paralelas e lisas	Tamanho: 19 x 15 x 14 cm ³	6	34	35	16	28	28
Condições de armazenamento: em ambiente controlado no laboratório	Condições de saturação da amostra no ensaio: seco	7	33	35	17	26	28
Orientação do martelo no ensaio: vertical, sentido para baixo (+90°) (desvio ±5°)	Temperatura do local de ensaio: 23°	8	33	35	18	25	26
Método de fixação: peso próprio em superfície anti-derrapante e pesos laterais para impedir movimentação do bloco	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	33	32	19	23	19
		10	32	32	20	19	19
* descrição litológica: Descrição litológica: Basalto amigdalóide com estado de alteração é W ₄ , podendo existir núcleos mais oxidados. É melanocrata com cor acastanhada, o que demonstra essa meteorização significativa. Apresenta uma textura hialocristalina com matriz afírica, sendo um basalto		Máximo		38		38	
		Mínimo		19		19	
		Média		31		31	
		Moda		32		36	
		Mediana		32		32	
		Q1		28,5		28,25	
		Q3		34		35,75	

				IQR (Q3-Q1)	5,5	7,5	
				Desvio-padrão	4,8	5,3	
				Coeficiente de variação (σ/m)	0,15	0,17	
				* valores normalizados à direcção de impacto 0º e por ordem decrescente			
							
Face A				Face B			
Outliers	Face A				Face B		
Critério de Chauvenet	Para $n = 20$ e $p=2,24$ rejeita-se o valor mínimo (resultado superior ao p -value em valor absoluto)				Para $n = 20$ e $p=2,24$ rejeita-se o valor mínimo (e o anterior por ser igual) (resultado superior ao p -value em valor absoluto)		
Critério de Peirce	Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ exclui-se o valor mínimo Para $n = 20$ e $R(2) = 1,914$ não se exclui nenhum valor limite				Para $n = 20$ e $R(1) = 2,209$ exclui-se o valor mínimo Para $n = 20$ e $R(2) = 1,914$ exclui-se o valor mínimo Para $n = 20$ e $R(3) = 1,732$ não se exclui nenhum valor limite		
Amplitude inter-quartile (outliers de 1ª espécie)	[12; 20,25]	1	O valor mínimo insere-se no intervalo de valores anómalos à esquerda	[10; 18,25]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método	
	[42,25; 50,5]	0		[40,25; 48,5]	0		
Estatísticos básicos sem outliers para a face A				Estatísticos básicos sem outliers para a face B			
Máximo	38			Máximo	38		
Mínimo	23			Mínimo	26		
Média	32			Média	32		
Moda	32			Moda	36		
Mediana	32			Mediana	32		
Q1	30			Q1	29		
Q3	34			Q3	36		
IQR (Q3-Q1)	4			IQR (Q3-Q1)	7		
Desvio padrão	3,9			Desvio padrão	3,5		
Coeficiente de variação (σ/m)	0,12			Coeficiente de variação (σ/m)	0,11		

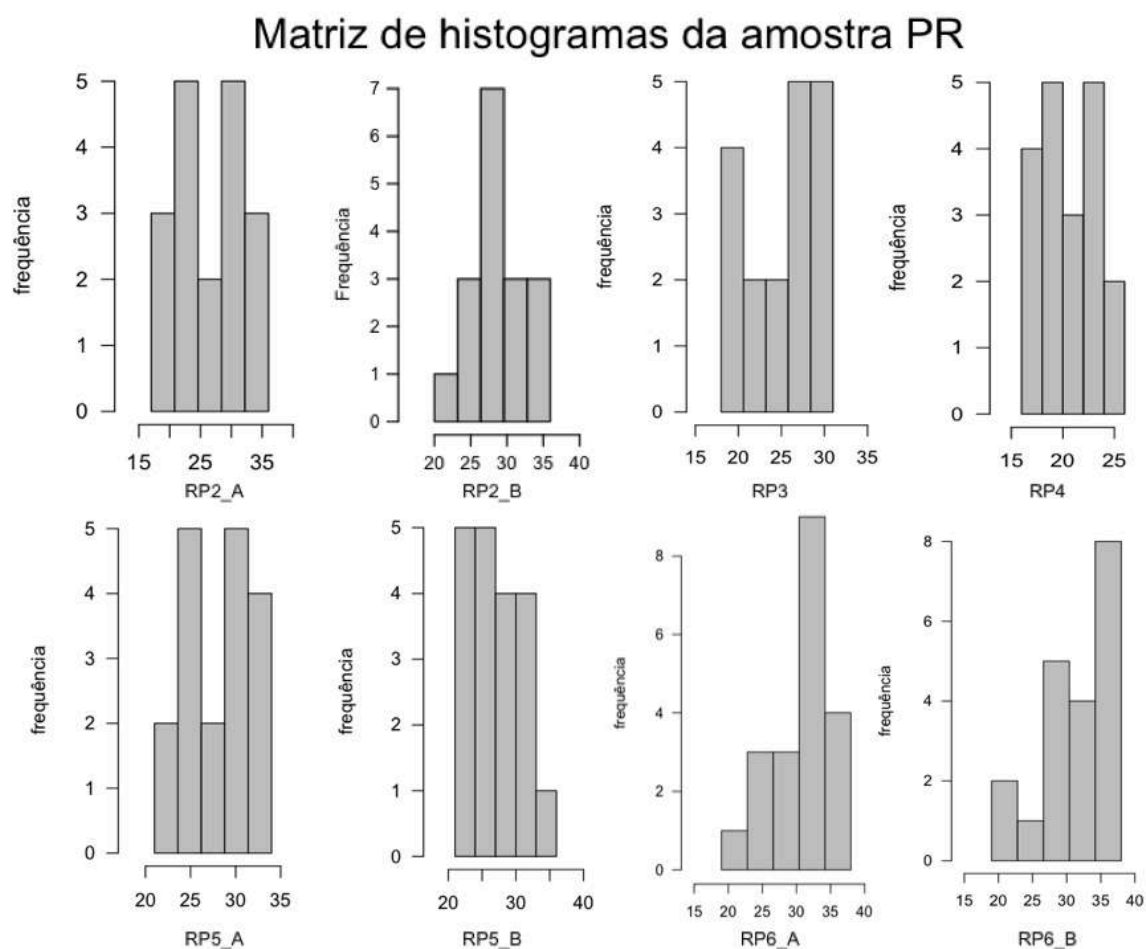


Figura C.5 Matriz de histogramas de dureza ao resalto dos blocos da amostra BA (RP=BA)

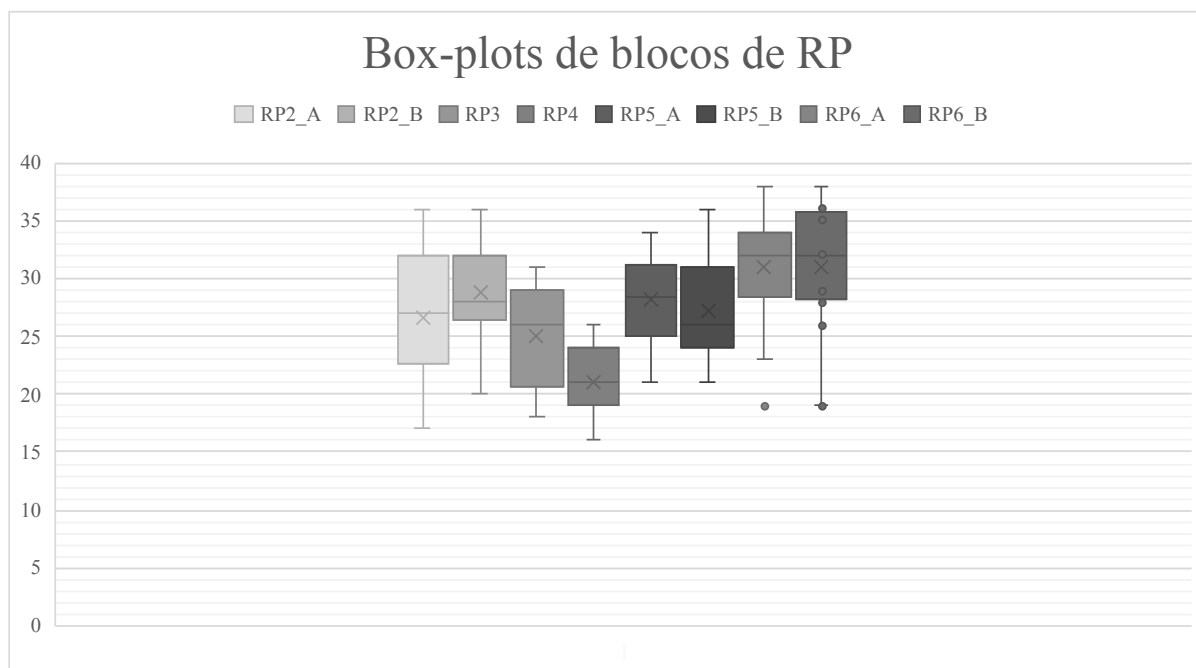


Figura C.6 Box-plots de dureza ao resalto de blocos da amostra BA (BA=RP)

C.3.4 BV

Tabela C.26 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao resalto na estação 1 do afloramento em Vialonga

Origem: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BV_E1	Localização: Pedreira Moita da Ladra (38°53'25,89"N; 9° 4'11,65"W)	1	60	11	48
Profundidade: afloramento em talude da pedreira	Orientação do talude: (N74°E, 82°SE)	2	58	12	47
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	56	13	47
Data de amostragem: não se fez amostragem	Data de ensaio: 5/07/2018	4	53	14	44
Tipo de amostra: afloramento	Método de corte da superfície: escavação mecânica	5	52	15	42
Forma: superfícies lisas expostas segundo diferentes planos de diaclase	Tamanho: -	6	51	16	40
Condições de armazenamento: -	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca às condições do local	7	50	17	38
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°, +45° e -45°)	Temperatura do local de ensaio: 25°	8	48	18	38
Método de fixação: -	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	48	19	34
		10	48	20	32
Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais fêlsicos, inferindo-se que é um basalto. O afloramento está fracturado, tendo mais do que 3 famílias de descontinuidades. É frequente apresentar-se descolorado, bem como oxidado superficialmente.		Máximo		60	
		Mínimo		32	
		Média		47	
		Moda		48	
		Mediana		48	
		Q1		40,5	
		Q3		51,75	
		IQR (Q3-Q1)		11,25	
		Desvio padrão		7,4	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,16	
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			
Outliers					
Critério de Chauvenet	Para n = 20 e p=2,24 não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)				
Critério de Peirce	Para n = 20 e R(1) = 2,209 não se exclui nenhum valor limite				

Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[6,75; 23,625]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[68,625; 85,5]	0	

Tabela C.27 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao ressalto na estação 2 do afloramento em Vialonga

Origem: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BV_E2	Localização: Pedreira Moita da Ladra (38°53'25,89"N; 9° 4'11,65"W)	1	60	11	42
Profundidade: afloramento em talude da pedreira	Orientação do talude: (N79°E, 86°SE)	2	56	12	42
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	50	13	41
Data de amostragem: não se fez amostragem	Data de ensaio: 5/07/2018	4	49	14	40
Tipo de amostra: afloramento	Método de corte da superfície: escavação mecânica	5	49	15	40
Forma: superfícies lisas expostas segundo diferentes planos de diaclase	Tamanho: -	6	48	16	38
Condições de armazenamento: -	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca às condições do local	7	47	17	38
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0° e -45°)	Temperatura do local de ensaio: 25°	8	46	18	38
Método de fixação: -	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561	9	45	19	38
		10	43	20	37
Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O afloramento está fracturado, tendo mais do que 3 famílias de descontinuidades. É frequente apresentar-se descolorado, bem como oxidado superficialmente.		Máximo		60	
		Mínimo		37	
		Média		44	
		Moda		38	
		Mediana		42,5	
		Q1		38,5	
		Q3		48,75	
		IQR (Q3-Q1)		10,25	
		Desvio padrão		6,2	
		Coeficiente de variação (σ/m)		0,14	
				* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente	
Outliers					
Critério de Chauvenet	Para n = 20 e p=2,24 rejeita-se o valor máximo (resultados superiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto). O mesmo para n=19 e p=2,22.				
Critério de Peirce	Para n = 20 e R(1) = 2,209 exclui-se o valor máximo Para n = 20 e R(2) = 1.914 não se exclui nenhum valor limite				

Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[7,75; 23,125]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[64,125; 79,5]	0	
Estatísticos univariados sem <i>outliers</i>			
Critério de Peirce (n=19)		Critério de Chauvenet (n=18)	
Máximo	56	Máximo	50
Mínimo	37	Mínimo	37
Média	44	Média	43
Moda	38	Moda	38
Mediana	42	Mediana	42
Q1	38	Q1	38
Q3	48	Q3	47,25
IQR (Q3-Q1)	10	IQR (Q3-Q1)	9,25
Desvio padrão	5,1	Desvio padrão	4,3
Coeficiente de variação (σ/m)	0,12	Coeficiente de variação (σ/m)	0,10

Tabela C.28 Descrição e resultados obtidos para o ensaio de dureza ao resalto na estação 3 do afloramento em Vialonga

Origem: CVL		Ensaio	R*	Ensaio	R*
Identificação da amostra: BV E3	Localização: Pedreira Moita da Ladra (38°53'25,89"N; 9° 4'11,65"W)	1	64	7	49
Profundidade: afloramento em talude da pedreira	Orientação do talude: (N74°E, 82°SE)	2	61	8	49
Litologia: basalto	Estado de alteração: W ₁₋₂	3	58	9	48
Data de amostragem: não se fez amostragem	Data de ensaio: 5/07/2018	4	57	10	48
Tipo de amostra: afloramento	Método de corte da superfície: escavação mecânica	5	54	11	46
Forma: superfícies lisas expostas segundo diferentes planos de diaclase	Tamanho: -	6	53	12	45
Condições de armazenamento: -	Condições de saturação da amostra no ensaio: seca às condições do local	Apenas foram feitas 12 leituras, além disso as 10 medições feitas subsequentemente diferem em mais de 4 unidades. Não foram cumpridos os requisitos propostos por Aydin (2009), logo os resultados devem ser tidos em conta com algumas reservas			
Orientação do martelo no ensaio: horizontal (0°, +45° e -45°)	Temperatura do local de ensaio: 25°				
Método de fixação: -	Tipo e modelo do martelo: L - CONTROLS 45-D561				
Descrição litológica: rocha melanocrata com textura holocristalina e afanítica. Desta forma, os minerais não são resolúveis a olho nu dificultando a sua identificação. Conclui-se, contudo, que a % minerais máficos é superior à % de minerais félsicos, inferindo-se que é um basalto. O afloramento está fracturado, tendo mais do que 3 famílias de descontinuidades. É frequente apresentar-se descolorado, bem como oxidado superficialmente.		Máximo	64		
		Mínimo	45		
		Média	53		
		Moda	49		
		Mediana	51		
		Q1	48		
		Q3	57,75		
		IQR (Q3-Q1)	9,75		
		Desvio padrão	5,9		
		Coeficiente de variação (σ/m)	0,11		
		* valores normalizados à direcção de impacto 0° e por ordem decrescente			
Outliers					
Critério de Chauvenet	Para n = 20 e p=2,24 não se rejeita nenhum valor limite (resultados inferiores ao <i>p-value</i> em valor absoluto)				
Critério de Peirce	Para n = 20 e R(1) = 2,209 não se exclui nenhum valor limite				

Amplitude inter-quartile (<i>outliers</i> de 1ª espécie)	[18,75; 33,375]	0	Não se identifica nenhum valor anómalo por este método
	[72,375; 87]	0	

Matriz de histogramas para as várias estações de BV

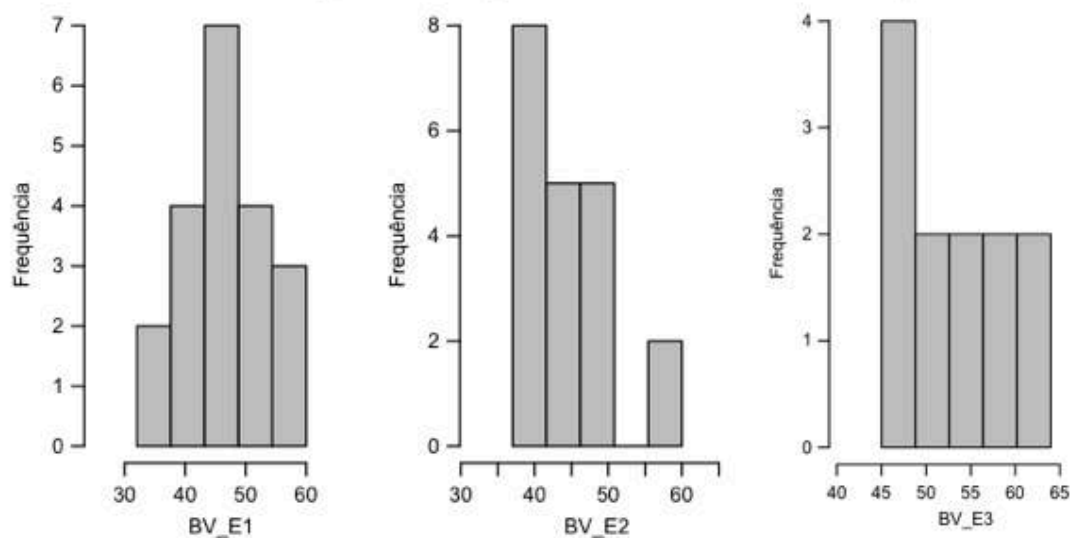


Figura C.7 Matriz de histogramas dos ensaios de dureza ao ressaltos feitos em cada estação do maciço dos basaltos de Vialonga

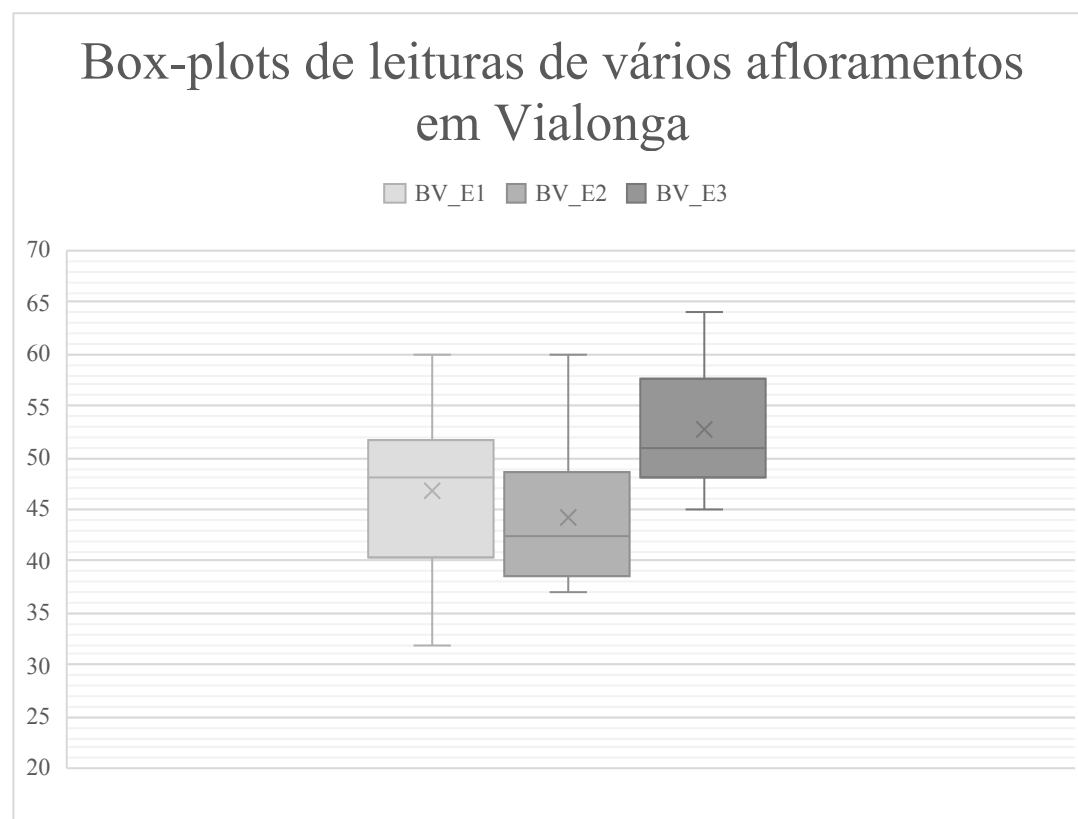


Figura C.8 Box-plots dos ensaios de dureza ao ressaltos feitos em cada estação do maciço dos basaltos de Vialonga

D. ENSAIOS DESTRUTIVOS

D.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Tabela D.1 Resultados do ensaio RCU da amostra BLV (grupo I e II)

Amostra: BLV																	
Data do ensaio: 26 e 27/07/2018																	
Equipamento de ensaio: prensa Seidner da FORM+TEST (D-88449 Redlingen)																	
Taxa de carregamento: 3 μm/s em BLVI e 2 μm/s em BLVII (com exceção do provete b.1 que foi 1 μm/s)																	
															Condições de saturação		
Provete		Lmédio (mm)	Dmédio (mm)	A (mm²)	t(ensaio) (s)	P (kN)	σc (MPa)	Et (GPa)	ν	Es (GPa)	ν	Em (GPa)	ν	Tipo de rotura	mw (g)	md (g)	w (%)
Grupo	nº.																
I	1	176	71,4	4003,93	404	301,38	75,27	20,18	N/D	15,02	N/D	21,42	N/D	extensão múltipla	560,52	551,71	1,60
	3	179	71,8	4048,92	398	328,32	80,70	23,00	0,28	16,88	0,38	24,22	0,40	extensão múltipla	110,12	108,36	1,62
	4	181	71,8	4048,92	230	246,54	60,89	27,21	0,13	19,52	0,19	22,45	0,15	cisalhamento múltiplo	143,51	142,03	1,04
	5	180	71,8	4048,92	280	139,73	34,51	12,54	0,52	8,53	0,18	N/D	N/D	cisalhamento simples	358,8	354,99	1,07
	6	181	71,7	4037,65	249	159,73	39,56	11,56	N/D	9,88	N/D	12,91	N/D	cisalhamento simples	276,9	274,33	0,94
	7	181	71,9	4060,20	250	159,25	59,22	21,69	0,22	11,06	0,73	18,37	0,67	cisalhamento simples	174,16	172,17	1,16

Nº. total de provetes: 6																	
II	1	176	71,1	3970,35	368	79,03	19,90	8,29	0,33	4,08	0,32	5,25	0,31	cisalhamento múltiplo	83,79	82,44	1,64
	3	177	70,7	3925,80	289	150,75	38,40	20,99	0,33	15,36	0,19	18,69	0,25	cisalhamento múltiplo	369,91	363,73	1,70
	4	178	70,9	3948,05	433	79,15	20,05	9,75	N/D	4,37	0,28	7,36	0,45	cisalhamento simples	623,07	614,32	1,42
	1	169	71,5	4015,15	827	210,62	52,46	11,63	0,87	12,53	0,45	11,44	0,45	cisalhamento múltiplo	89,78	86,14	4,23
	2	179	71,5	4015,15	402	139,25	34,68	9,34	0,47	8,94	0,43	10,85	0,44	cisalhamento múltiplo	349,7	336,80	3,83
	3	176	71,7	4037,65	297	52,45	12,99	7,97	0,65	3,97	0,47	4,37	0,51	cisalhamento simples	118,14	115,01	2,72
Nº. total de provetes: 6																	

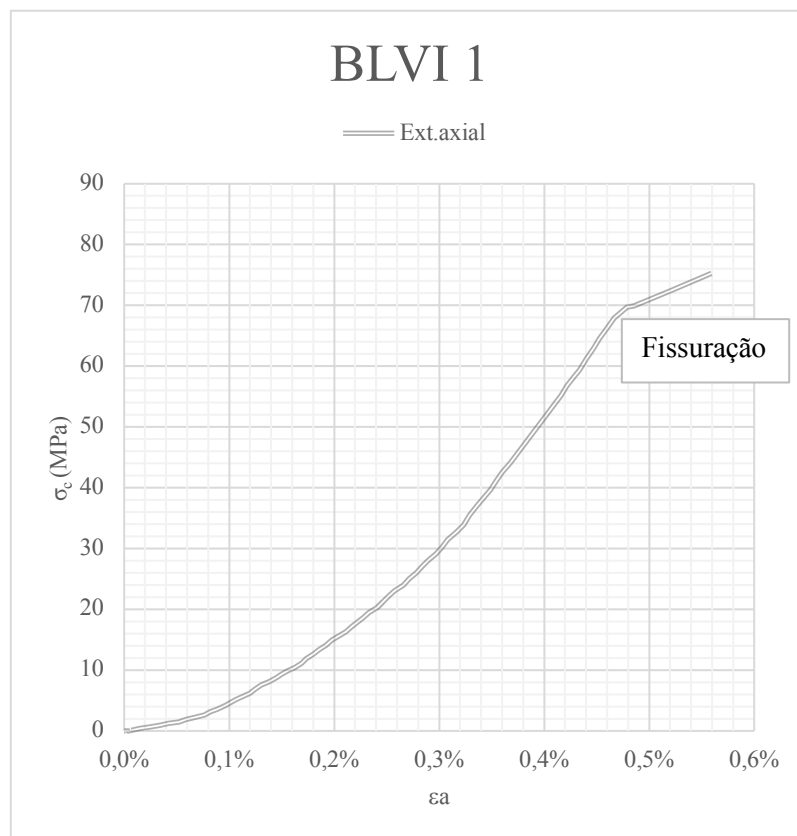
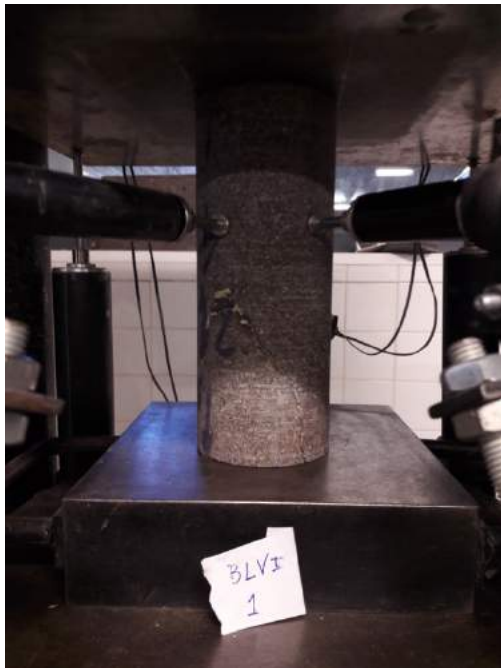


Figura D.1 Provete BLVI 1 e respectiva curva tensão-deformação

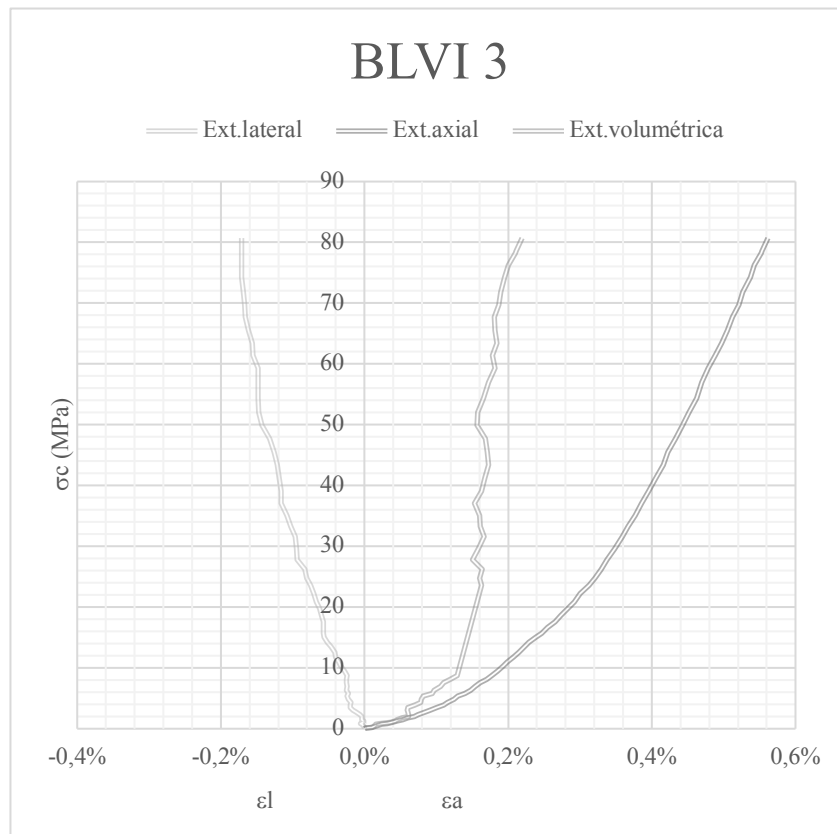


Figura D.2 Provete BLVI 3 e respectiva curva tensão-deformação

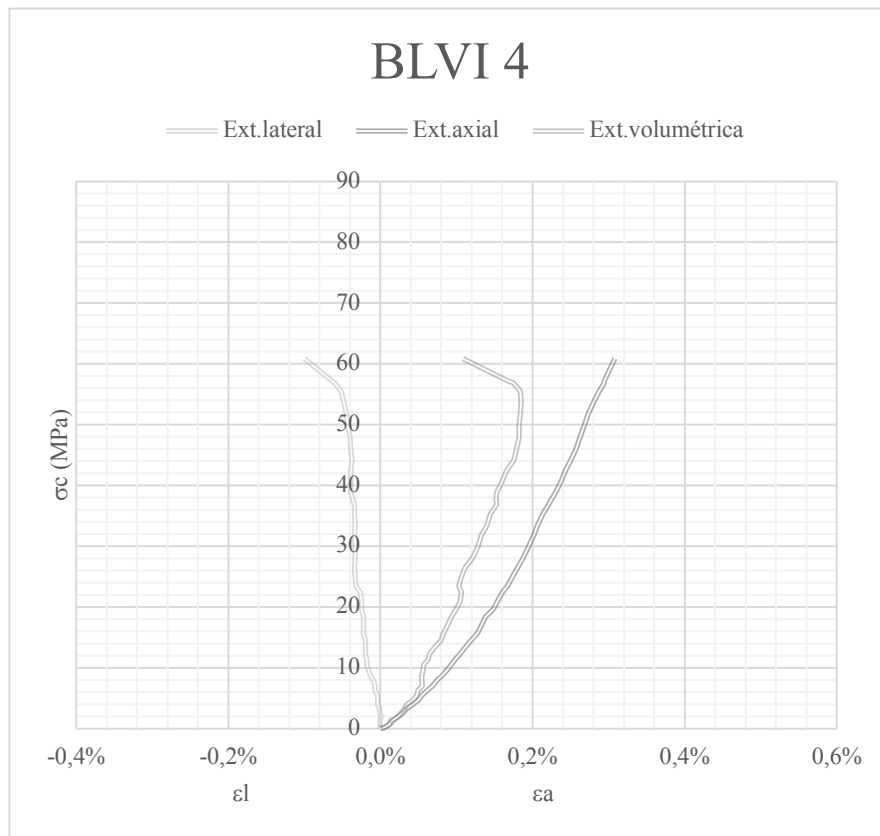
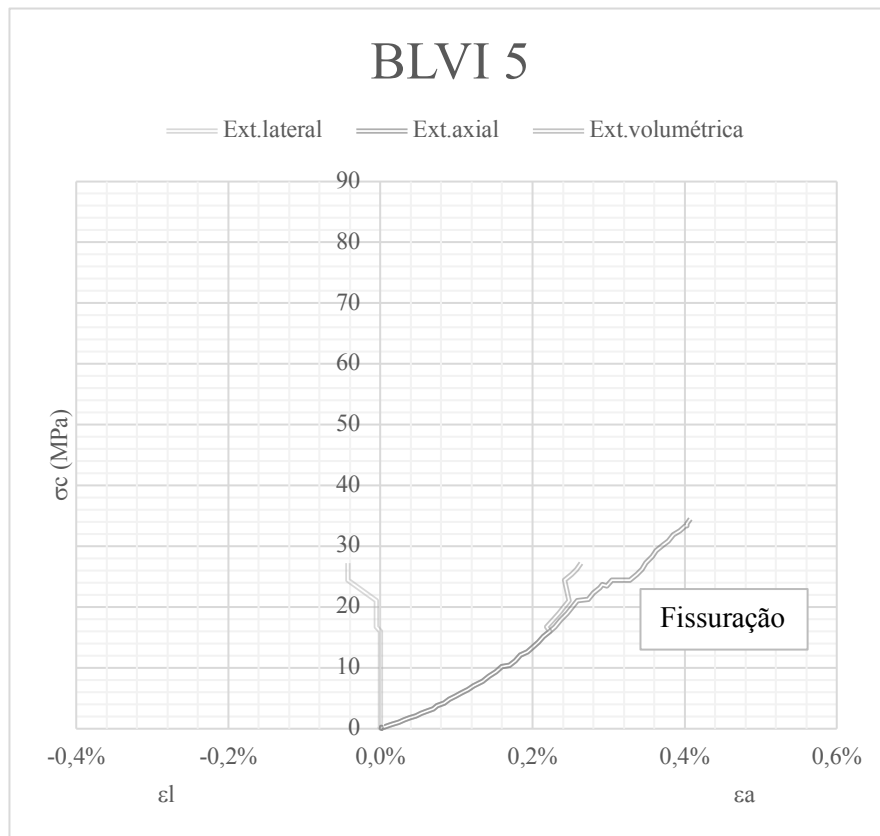
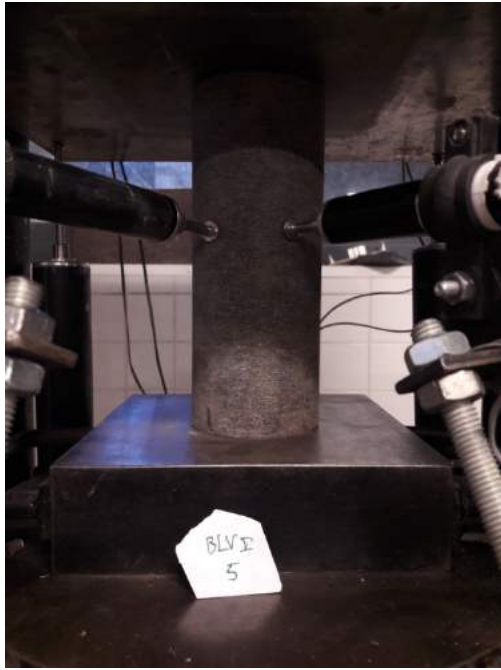


Figura D.3 Provete BLVI 4 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.4 Provete BLVI 5 e respectiva curva tensão-deformação

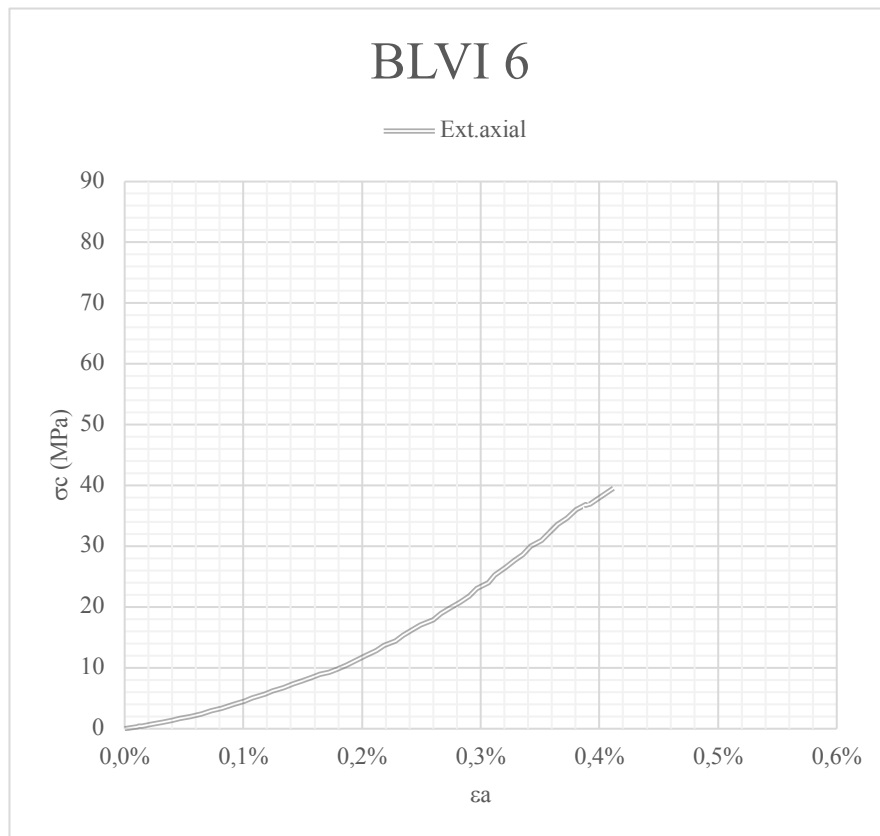


Figura D.5 Provete BLVI 6 e respectiva curva tensão-deformação

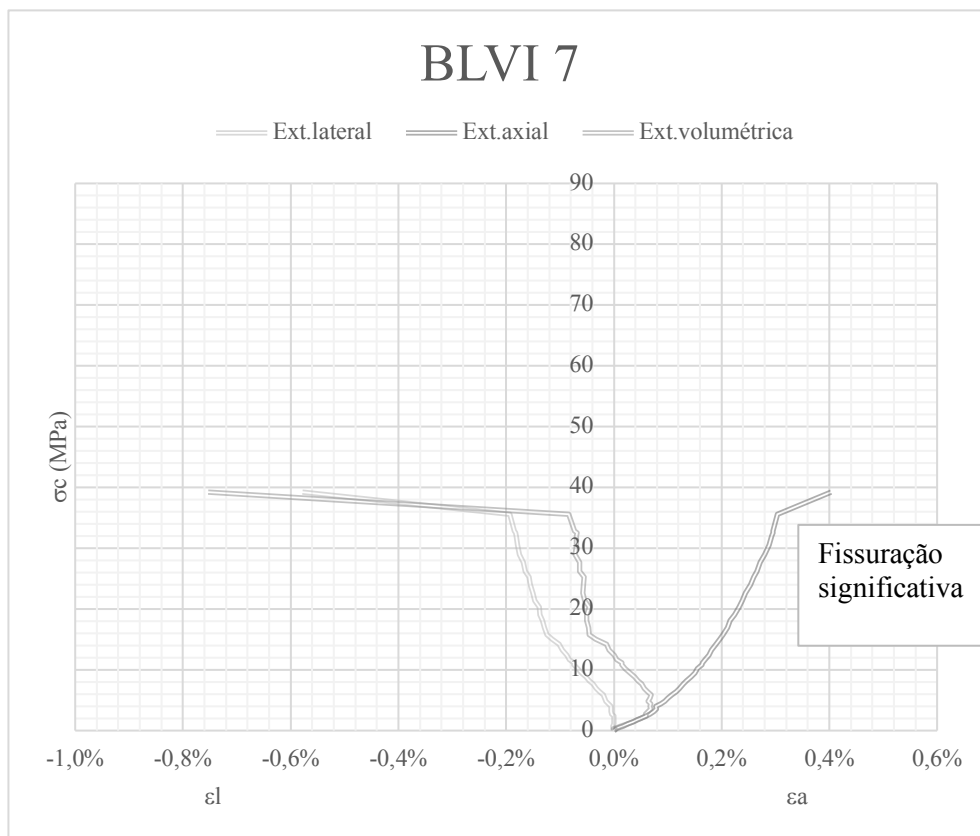
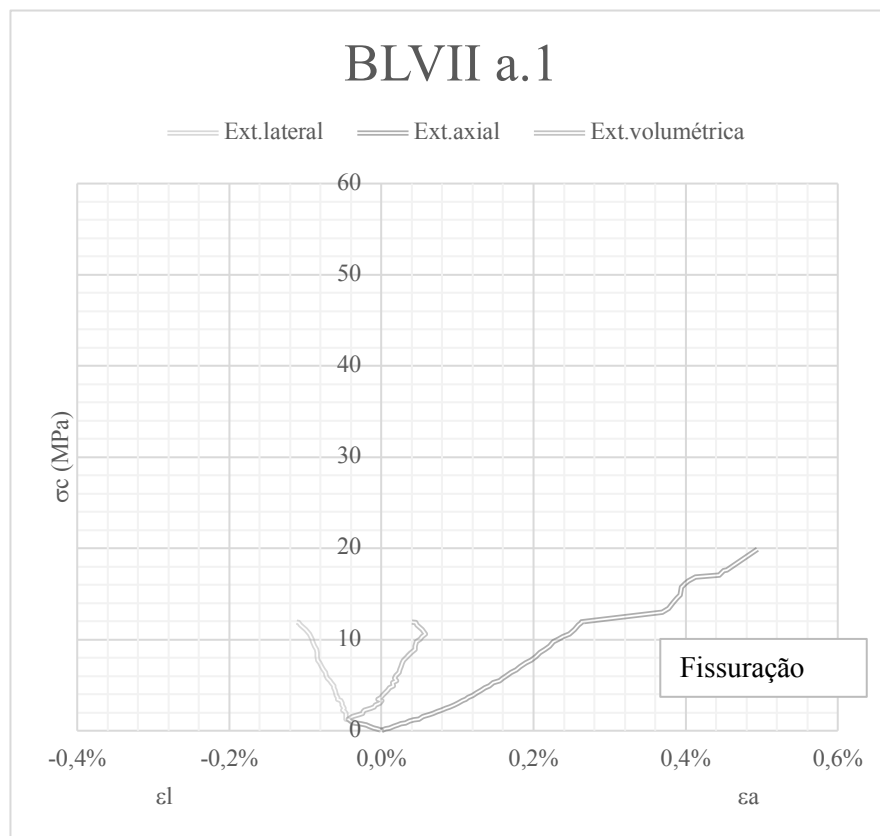


Figura D.6 Provete BLVI 7 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.7 Provete BLVII a.1 e respectiva curva tensão-deformação

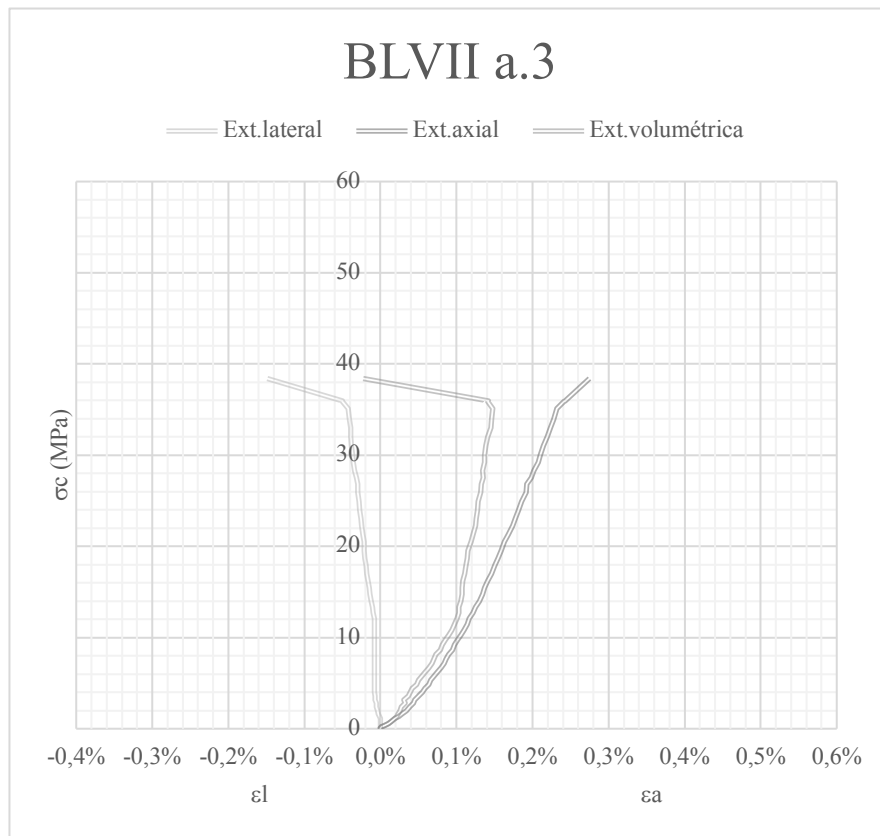
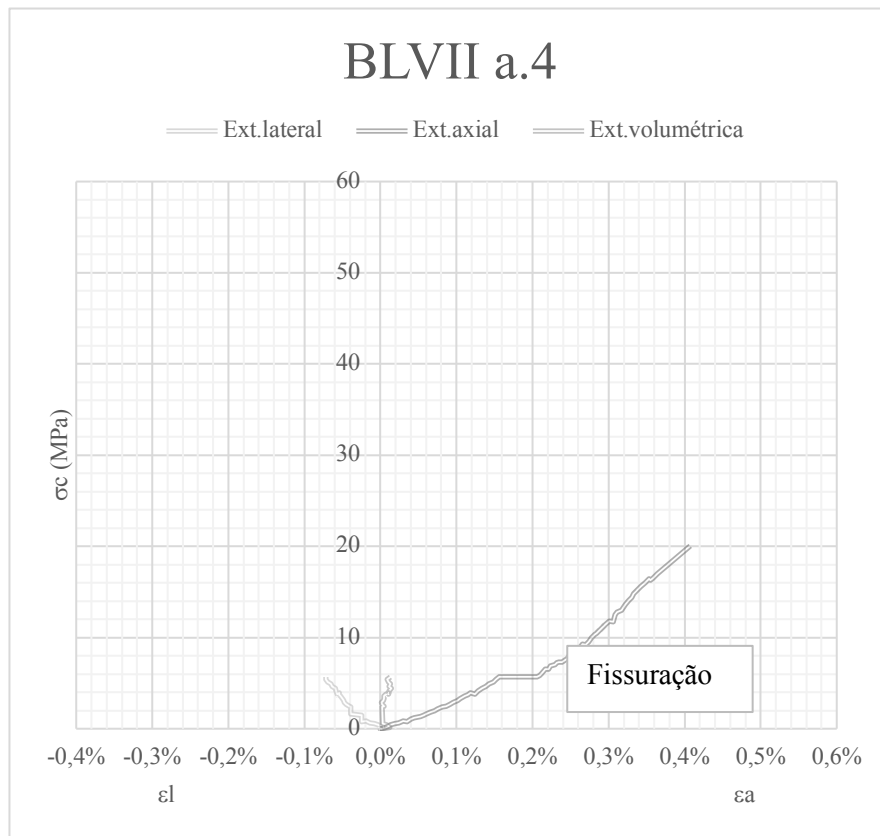


Figura D.8 Provete BLVII a.3 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.9 Provete BLVII a.4 e respectiva curva tensão-deformação

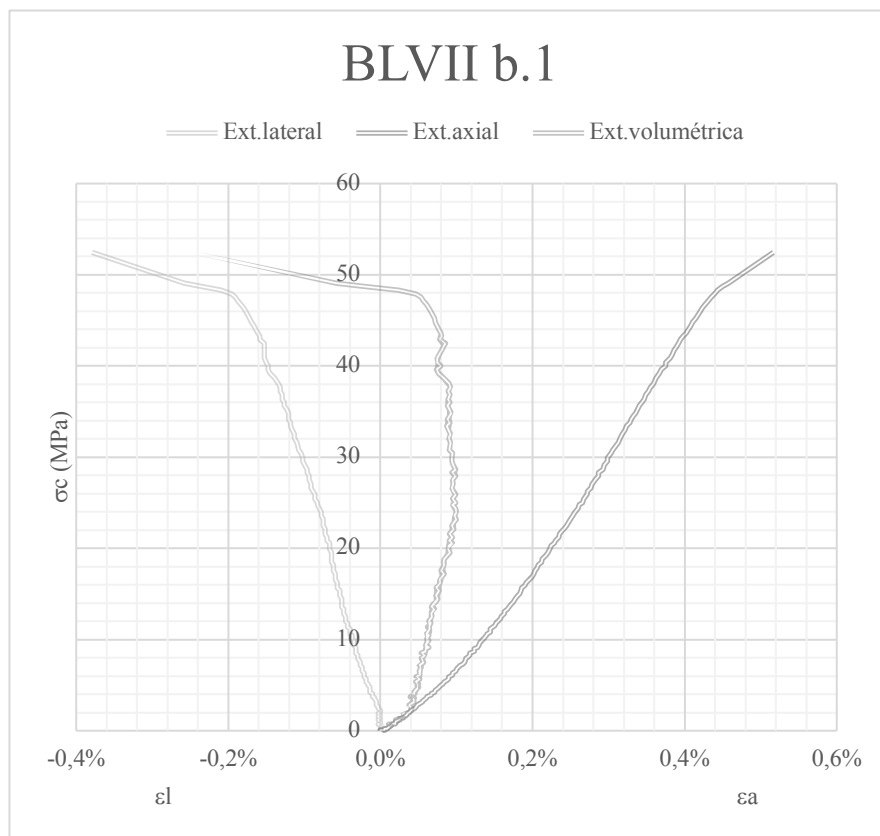


Figura D.10 Provete BLVII b.1 e respectiva curva tensão-deformação

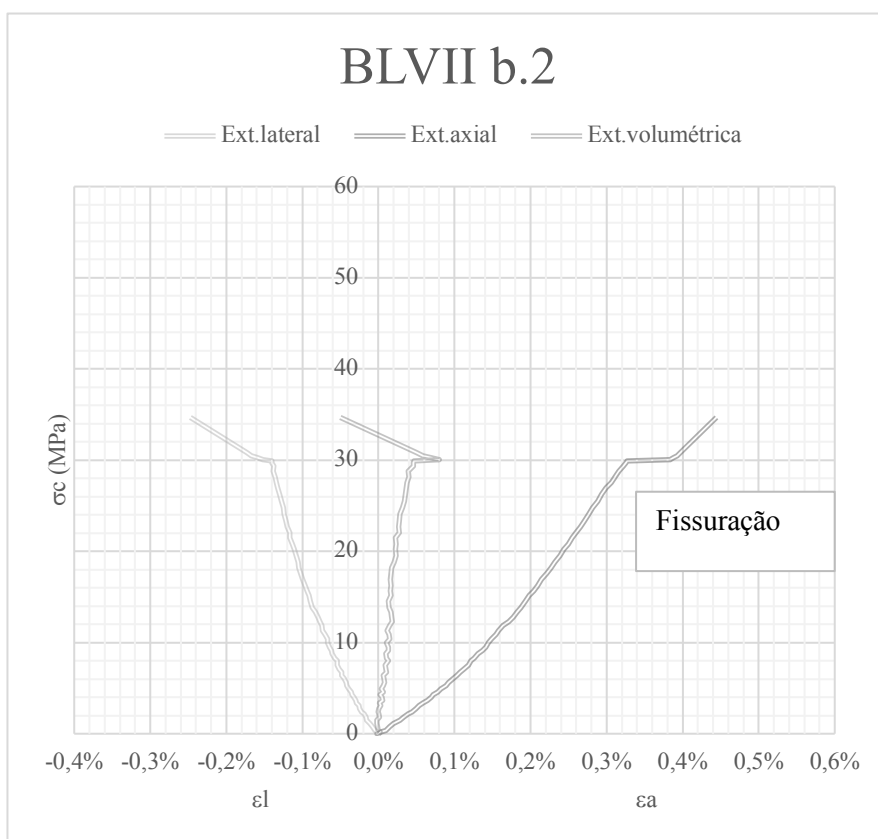


Figura D.11 Provete BLVII b.2 e respectiva curva tensão-deformação

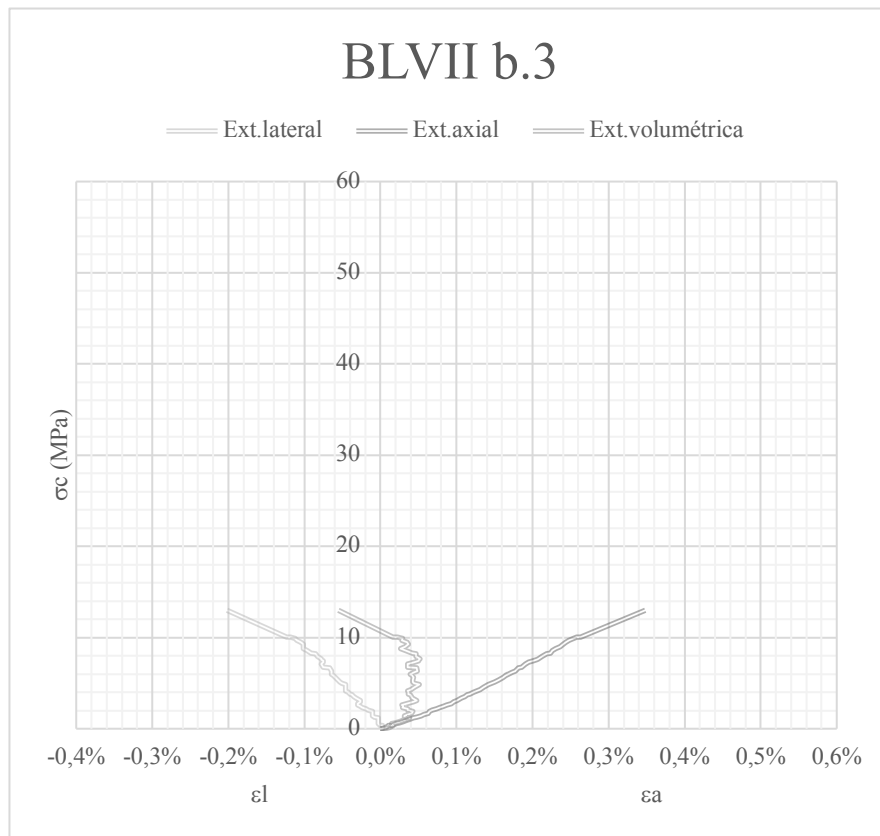


Figura D.12 Provete BLVII b.3 e respectiva curva tensão-deformação

Tabela D.2 Resultados do ensaio RCU da amostra BLA (grupo I)

Amostra: BLA																		
Data do ensaio: 25/07/2018																		
Equipamento de ensaio: prensa Seidner da FORM+TEST (D-88449 Redlingen)																		
Taxa de carregamento: 2 μm/s para todos os provetes, excepto BLAI 8 (1 μm/s) e BLAI 9 (3 μm/s)																		
														Condições de saturação				
Provete		Lmédio (mm)	Dmédio (mm)	A (mm²)	t(ensaio) (s)	P (kN)	σ _c (MPa)	Et (GPa)	ν	Es (GPa)	ν	Em (GPa)	ν	Tipo de rotura	m _w (g)	m _d (g)	w (%)	
Grupo	nº.																	
I	1	156	61,2	2941,66	92,52	92,52	92,52	27,78	0,17	28,39	0,36	30,93	0,41	cisalhamento simples	183,80	182,72	0,59	
	2	158	61,1	2932,06	51,90	51,90	51,90	20,46	0,20	14,25	0,45	18,96	0,39	extensão múltipla	138,97	136,32	1,94	
	3	156	61,2	2941,66	37,73	37,73	37,73	6,88	0,27	6,06	0,48	7,08	0,44	extensão simples	47,91	46,84	2,28	
	4	159	61,2	2941,66	68,18	68,18	68,10	16,85	0,26	13,09	0,50	18,72	0,31	extensão múltipla	95,24	93,10	2,30	
	5	156	61,2	2941,66	51,17	51,17	51,17	11,91	0,17	8,97	0,54	14,59	0,66	fracturação múltipla	242,12	238,35	1,58	
	6	152	61,3	2951,28	57,83	57,83	19,60	10,28	N/D	7,92	N/D	8,81	N/D	cisalhamento múltiplo	327,77	321,33	2,00	
	7	152	61,2	2941,66	59,39	59,39	20,19	10,31	0,65	6,35	0,33	8,16	0,43	cisalhamento múltiplo	164,17	160,71	2,15	
	8	151	61,1	2932,06	39,87	39,87	13,60	i	i	i	i	i	i	i	i	114,87	112,21	2,37
	9	152	61,3	2951,28	91,60	91,60	31,04	8,81	N/D	4,66	0,33	N/D	N/D	cisalhamento múltiplo	124,25	121,43	2,32	
	10	153	61,3	2951,28	163,92	163,92	55,54	20,82	0,27	18,01	0,50	18,45	0,35	extensão múltipla	179,95	176,65	1,87	
	11	155	61,1	2932,06	176,73	176,73	60,28	15,53	0,15	16,39	0,17	18,07	0,13	fracturação múltipla	172,88	171,02	1,09	
Nº. total de provetes: 10 (11 com um ensaio inválido); i - inválido																		

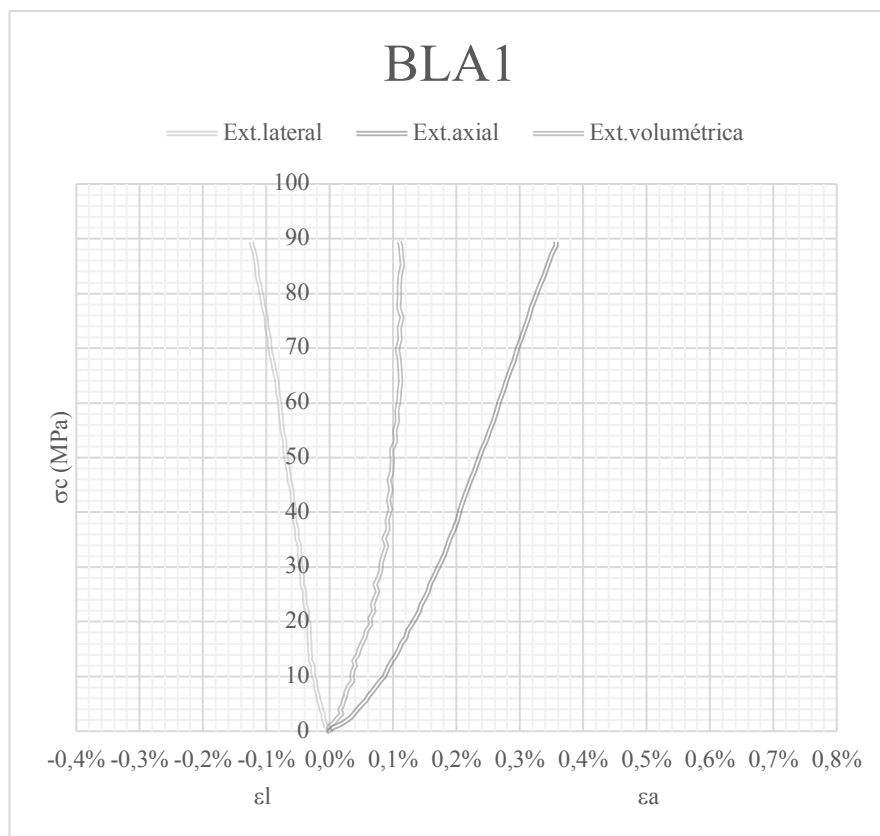
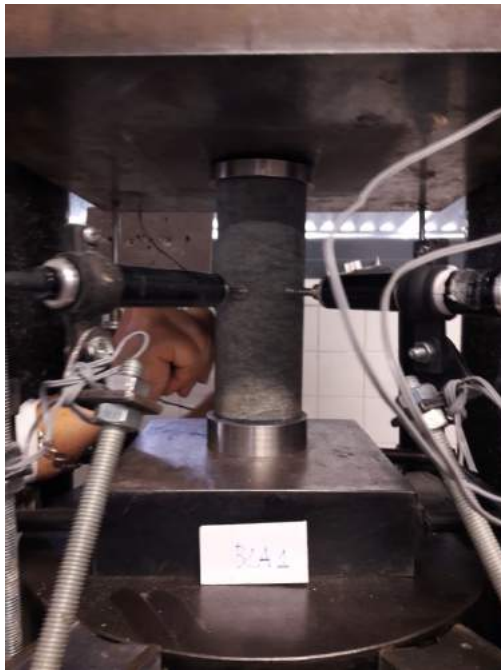


Figura D.13 Provete BLAI 1 e respectiva curva tensão-deformação

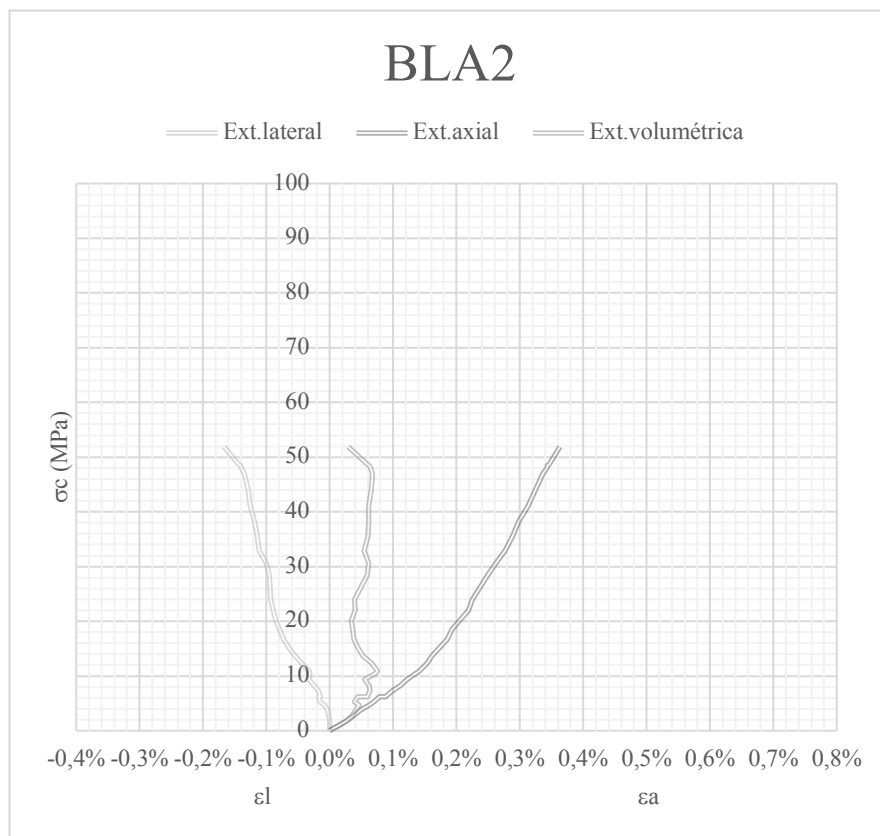
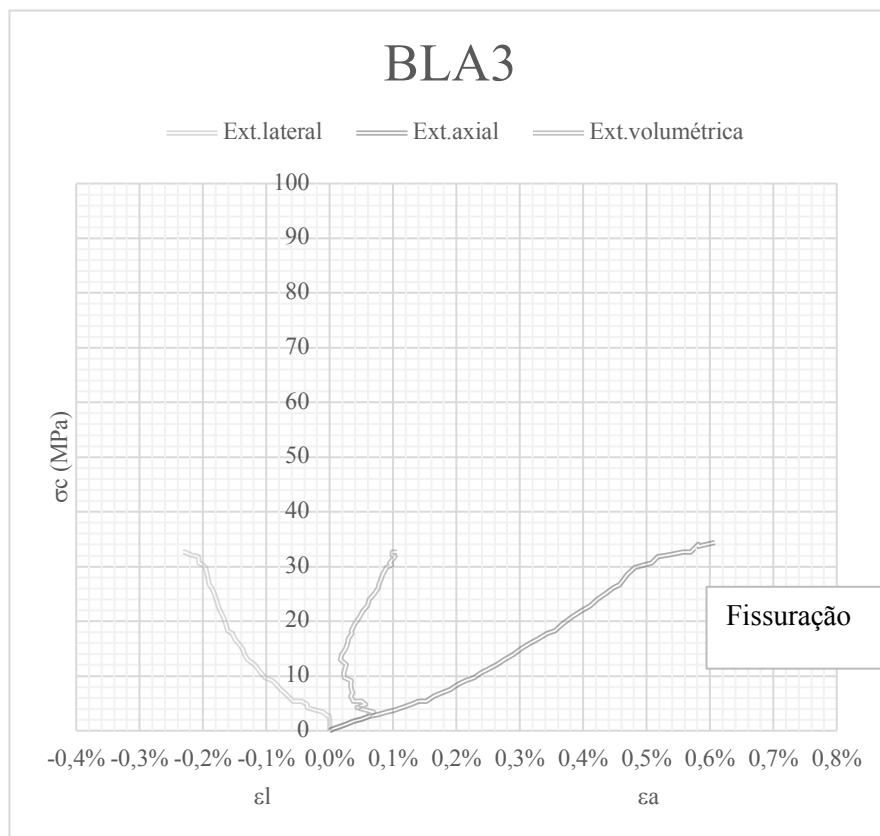
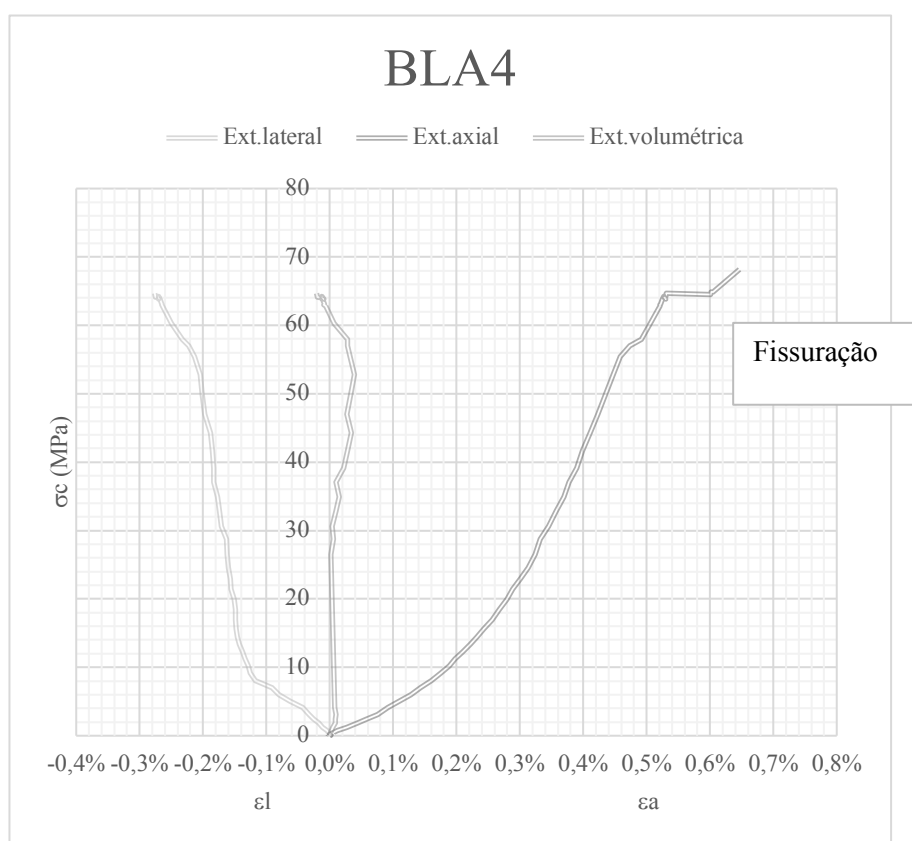


Figura D.14 Provete BLAI 2 e respectiva curva tensão-deformação



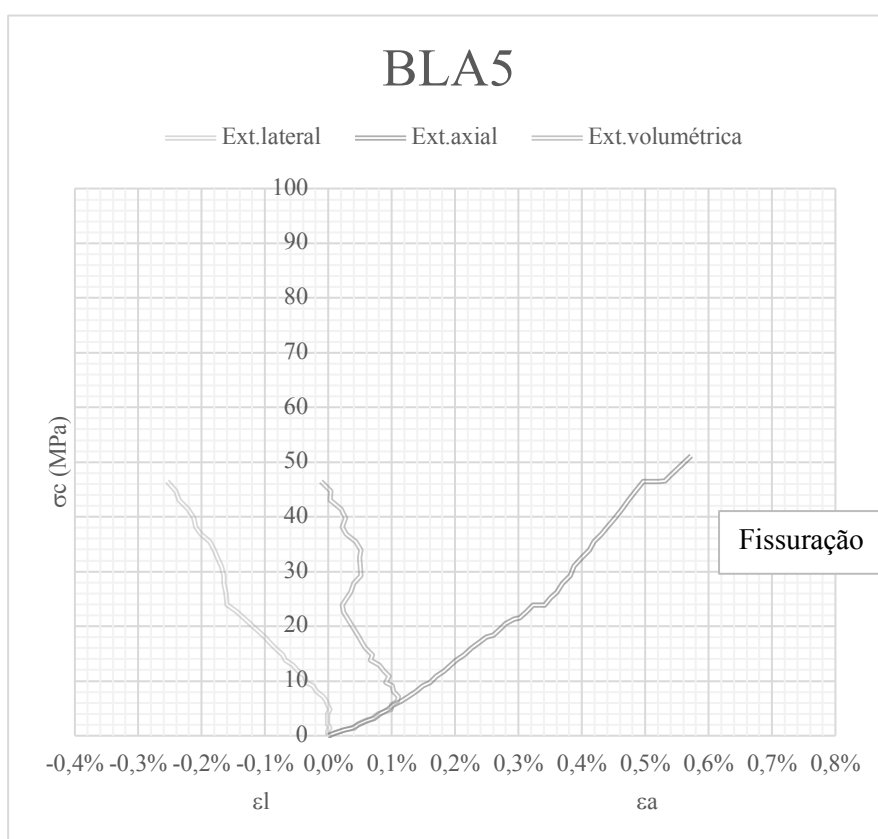
Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.15 Provete BLAI 3 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.16 Provete BLAI 4 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.17 Provete BLAI 5 e respectiva curva tensão-deformação

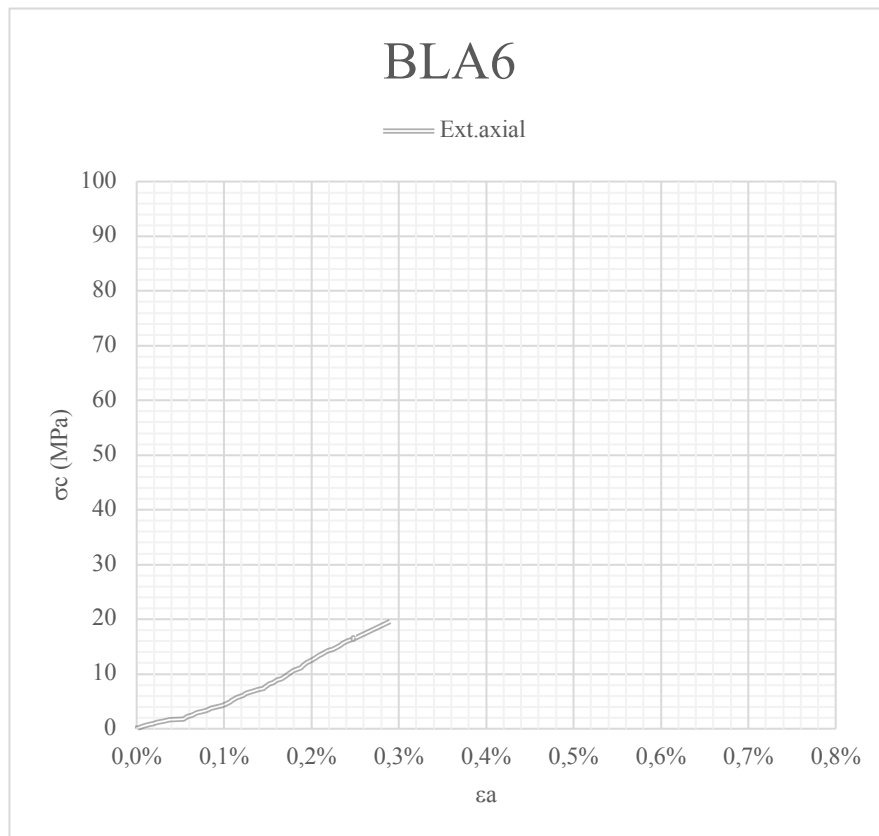


Figura D.18 Provete BLAI 6 e respectiva curva tensão-deformação

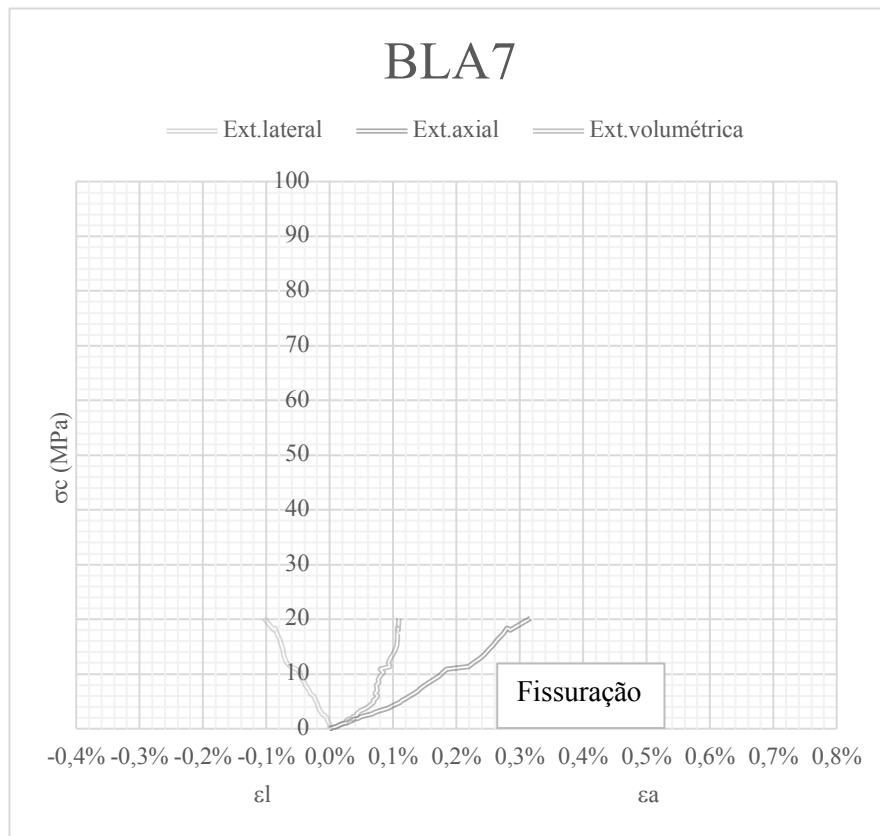


Figura D.19 Provete BLAI 7 e respectiva curva tensão-deformação



Figura D.20 Provete BLAI 8 e respectiva curva tensão-deformação (inválido)

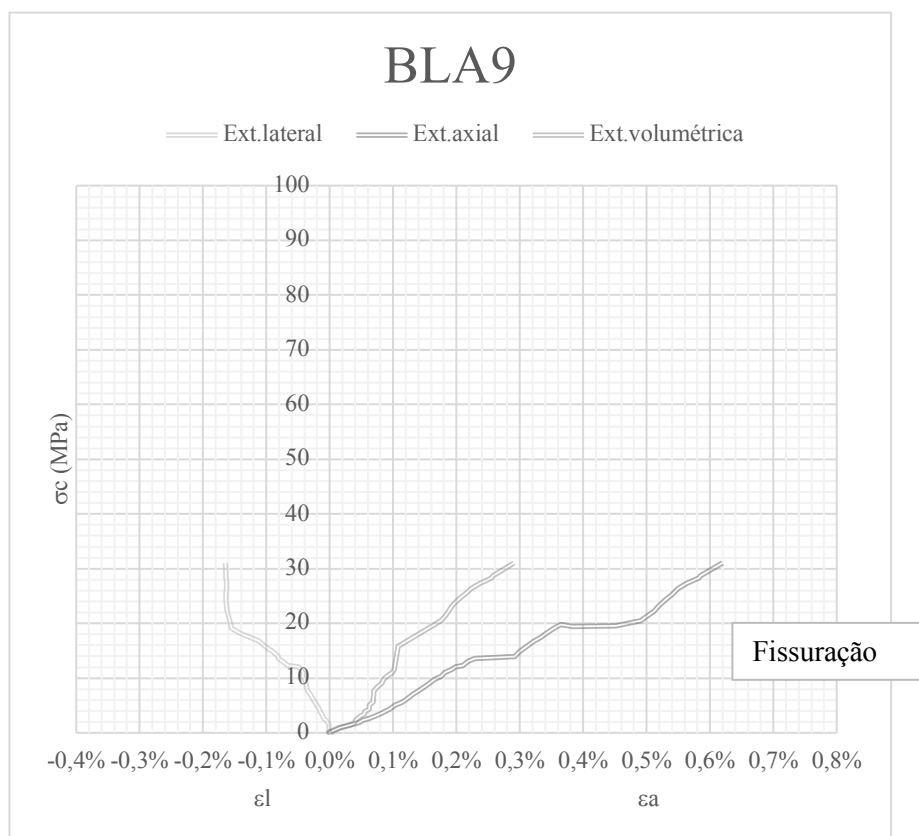


Figura D.21 Provete BLAI 9 e respectiva curva tensão-deformação

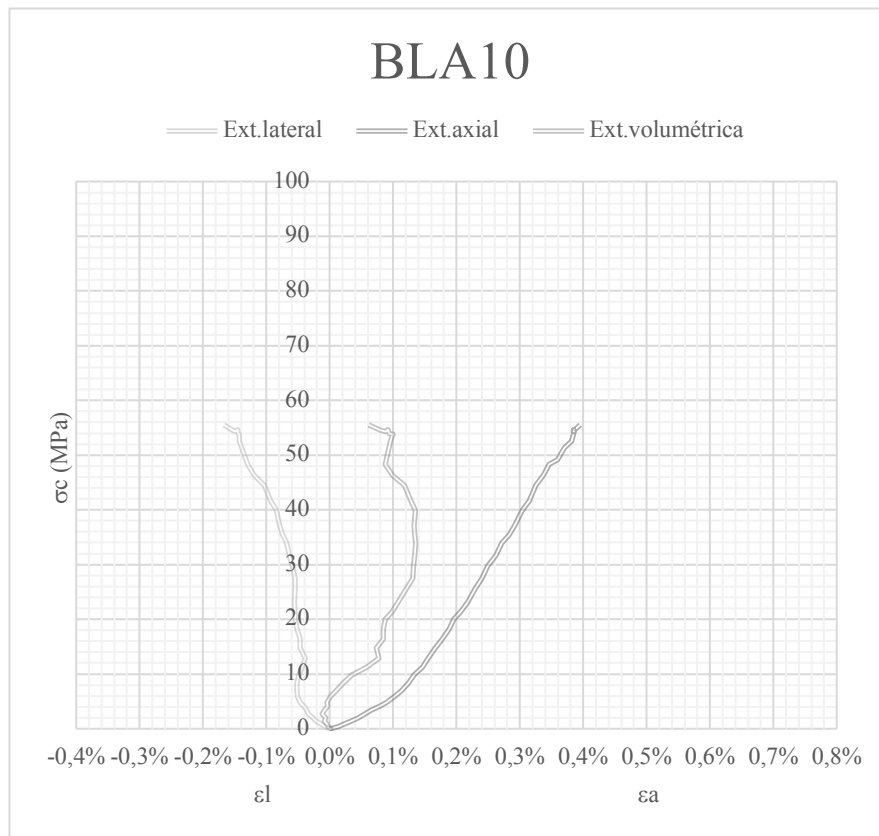


Figura D.22 Provete BLAI 10 e respectiva curva tensão-deformação

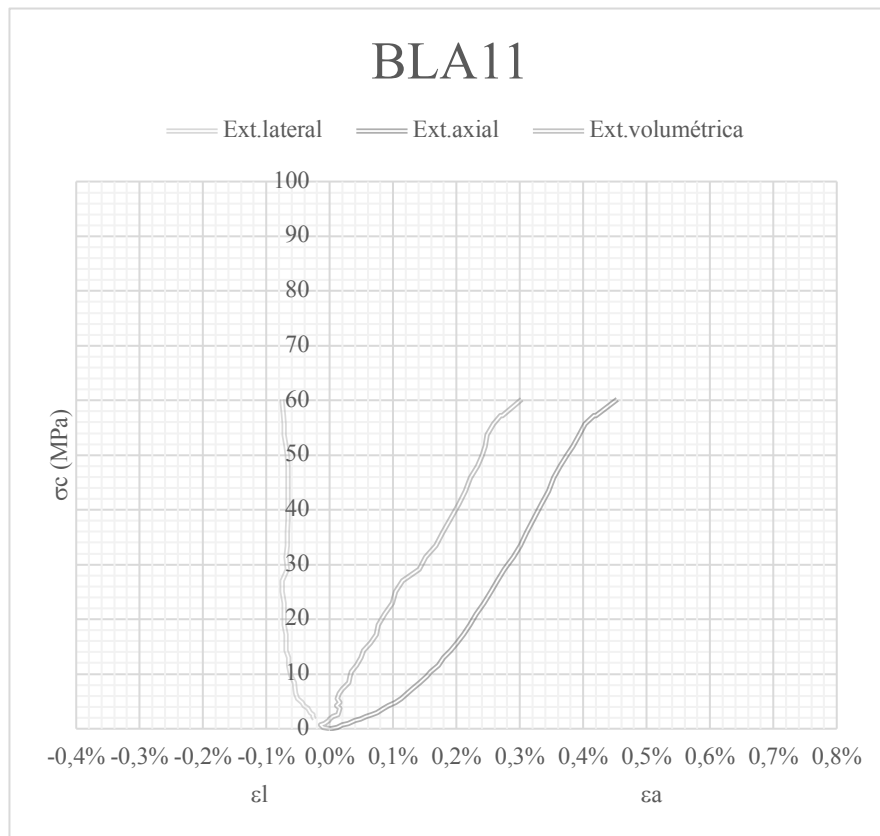


Figura D.23 Provete BLAI 11 e respectiva curva tensão-deformação

Tabela D.3 Resultados do ensaio RCU da amostra BQ

Amostra: BQ																	
Data do ensaio: 25/07/2018																	
Equipamento de ensaio: prensa Seidner da FORM+TEST (D-88449 Redlingen)																	
Taxa de carregamento: 3 µm/s para todos os provetes																	
															Condições de saturação		
Proвете		L _{médio} (mm)	D _{médio} (mm)	A (mm²)	t(ensaio) (s)	P (kN)	σ _c (MPa)	Et (GPa)	ν	Es (GPa)	ν	Em (GPa)	ν	Tipo de rotura	m _w (g)	m _d (g)	w (%)
Bloco	nº.																
1	2	150	60,10	2836,87	355	462,06	162,88	36,93	0,27	26,99	0,20	35,10	0,16	fracturação múltipla	125,69	125,31	0,30
2	4	147	60,00	2827,43	363	574,26	203,10	46,86	0,23	38,25	0,23	48,32	0,16	fracturação múltipla	83,41	82,94	0,57
	5	148	60,10	2836,87	253	184,52	65,04	32,54	N/D	17,74	0,42	24,00	0,24	cisalhamento múltiplo	78,26	77,88	0,49
3	6	148	60,10	2836,87	409	525,28	185,16	35,40	0,13	27,32	0,50	39,48	0,22	fracturação múltipla	145,00	144,50	0,35
5	7	145	60,00	2827,43	239	256,60	90,75	7,41	0,25	19,77	0,29	19,01	0,19	extensão múltipla	182,40	181,79	0,34
	8	149	60,10	2836,87	357	341,97	120,54	40,18	0,23	24,48	0,29	32,43	0,21	fracturação múltipla	190,96	190,41	0,29
Nº. total de provetes: 6																	

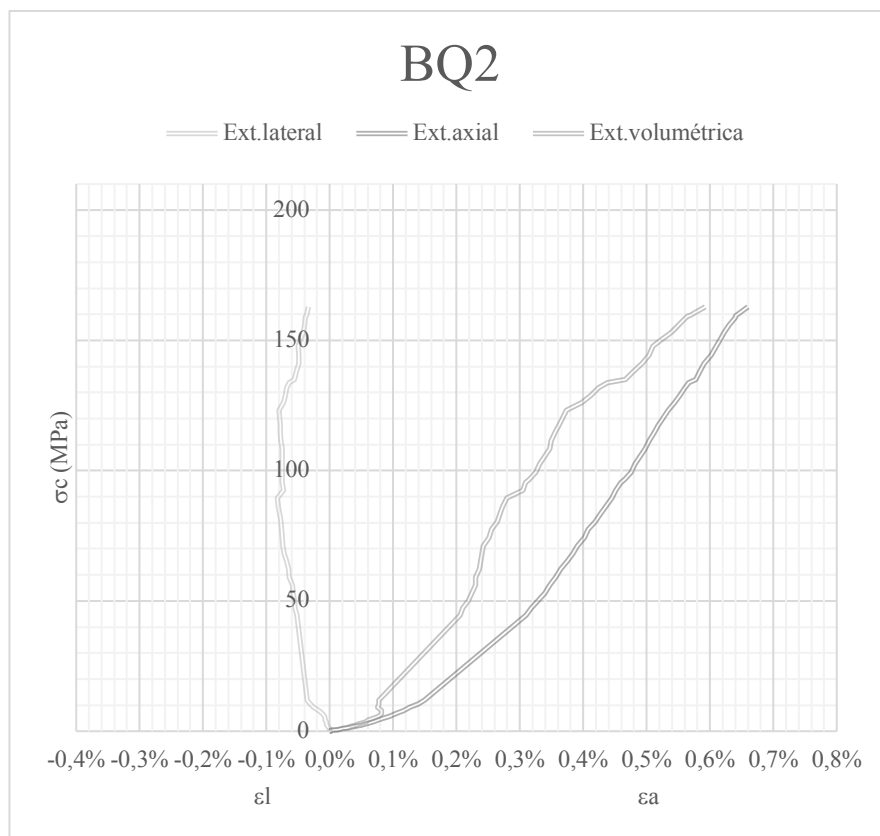


Figura D.24 Provete BQ 2 e respectiva curva tensão-deformação

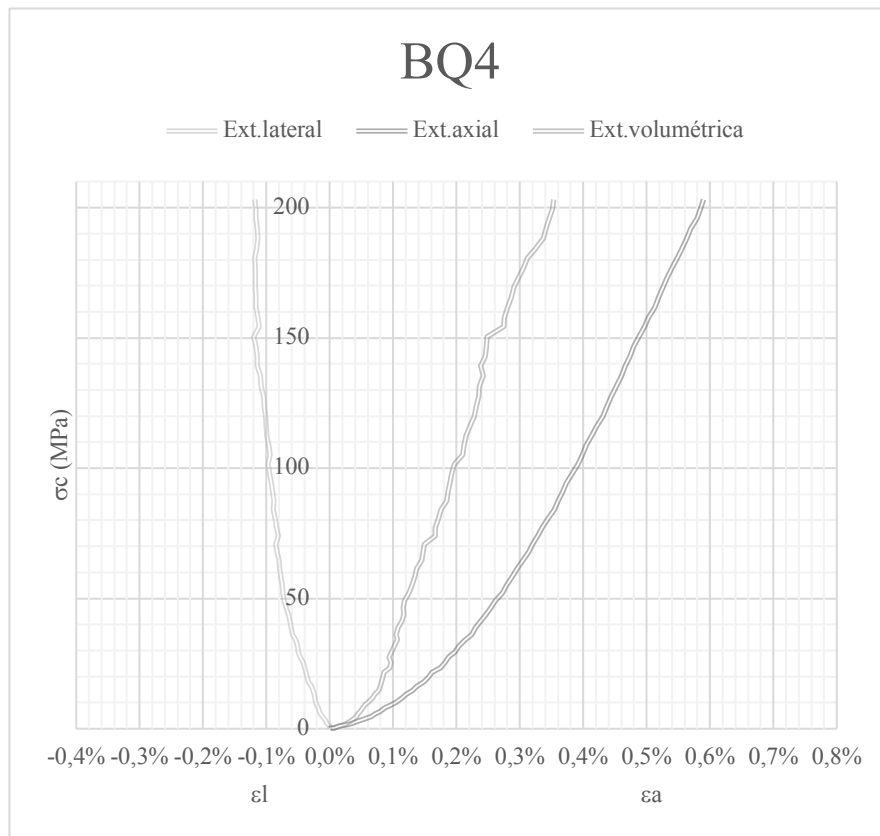


Figura D.25 Provete BQ 4 e respectiva curva tensão-deformação

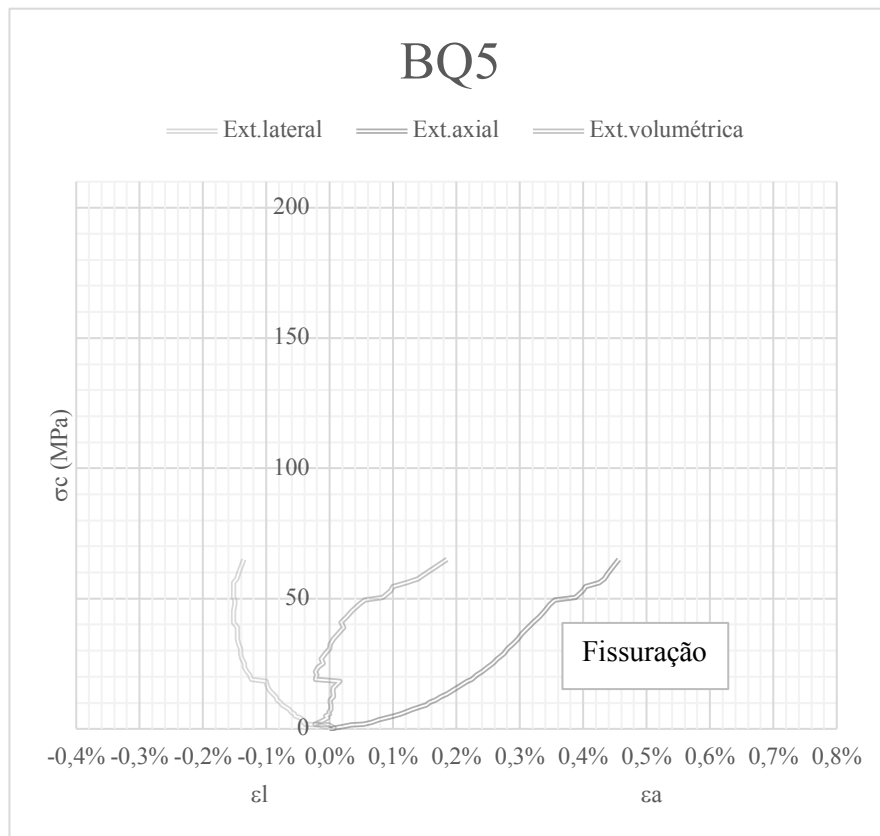
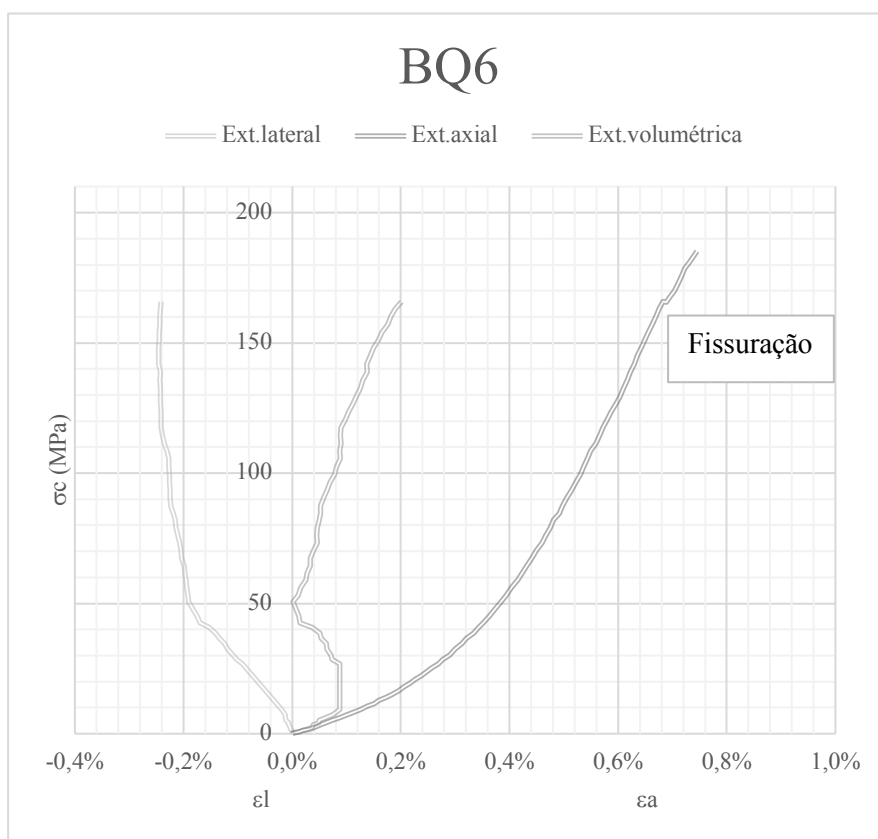


Figura D.26 Provete BQ 5 e respectiva curva tensão-deformação



Nota: a fracturação no provete afectou os LVDTs laterais, sendo que apenas se apresenta a extensão lateral e volumétrica até esse ponto

Figura D.27 Provete BQ 6 e respectiva curva tensão-deformação

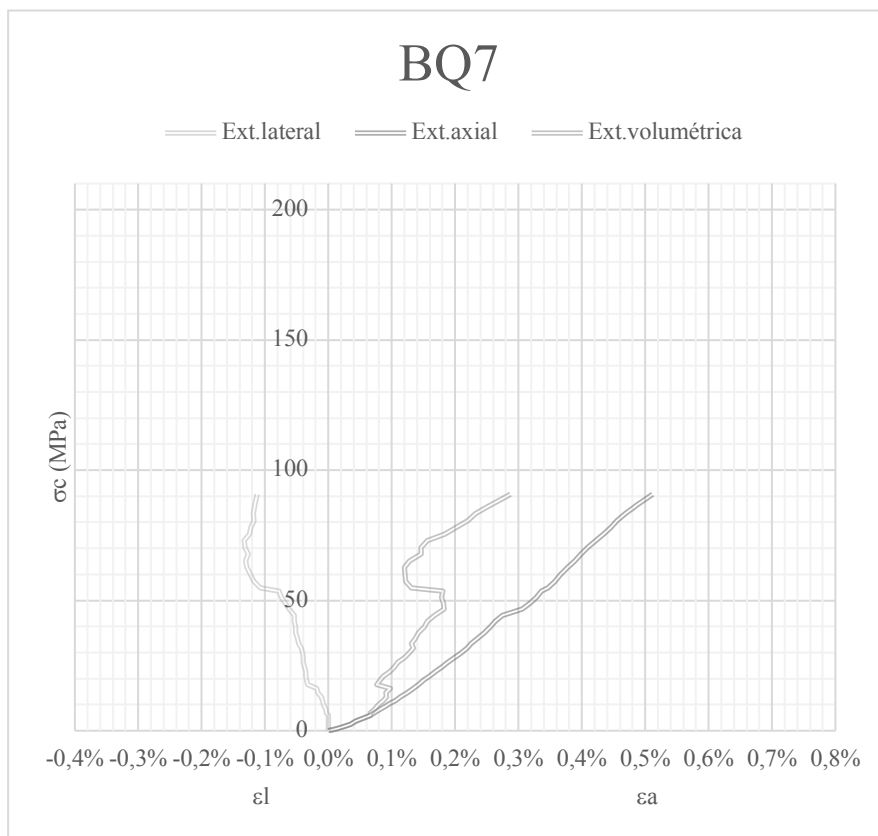


Figura D.28 Provete BQ 7 e respectiva curva tensão-deformação

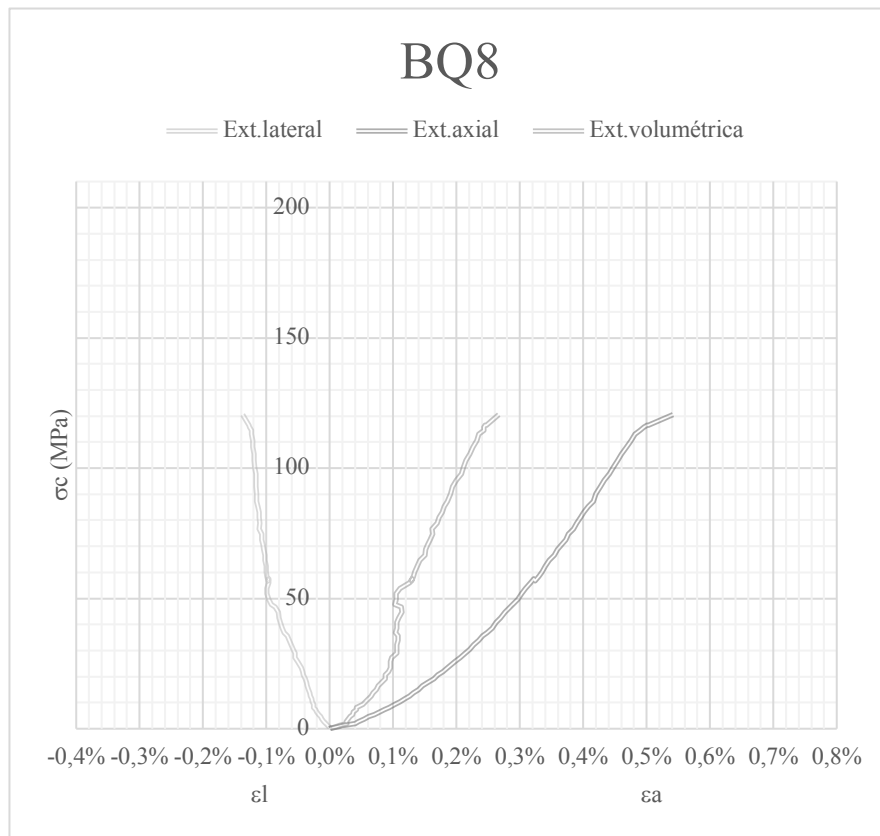
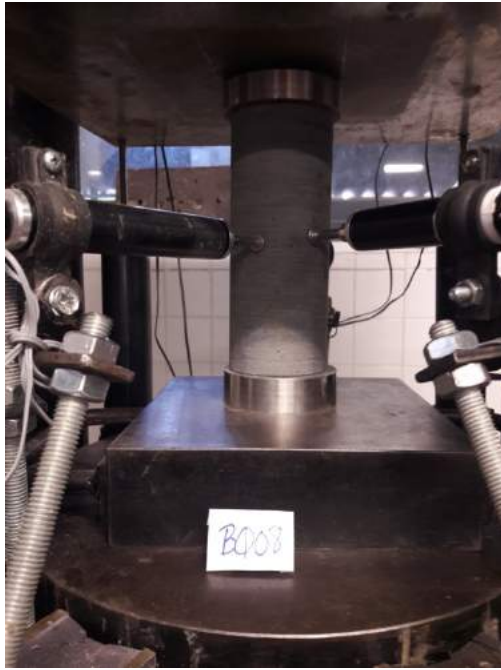


Figura D.29 Provete BQ 8 e respectiva curva tensão-deformação

D.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PONTUAL

Tabela D.4 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BLV e respectivas imagens dos provetes após ensaio (grupo I)

Amostra: BLV													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN													
Data de ensaio: 8/06/2018													
Todos os testes foram feitos em laboratório													
Provetes		Tipo de teste	D _{médio}	D _{equipamento}	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm ²)	D _e ² (mm)	D _e (mm)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)
Grupo	nº.												
I	1	a	36,00	36	71,60	28,14	singular	2578	3282	57,3	8,57	1,06	9,12
	2	a	36,36	36	71,20	14,26	irregular	2589	3296	57,4	4,33	1,06	4,60
	3	a	33,00	33	71,24	8,70	singular	2351	2993	54,7	2,91	1,04	3,03
	4	a	35,56	35,5	71,48	19,10	singular	2542	3236	56,9	5,90	1,06	6,25
	5	a	34,62	34	71,66	15,62	singular	2481	3159	56,2	4,95	1,05	5,21
	6	a	34,73	35	71,55	8,88	irregular	2485	3164	56,2	2,81	1,05	2,96
	7	a	31,63	31,5	71,63	24,48	junção tripla	2266	2885	53,7	8,49	1,03	8,76
	10	a	34,82	34	71,70	31,56	singular	2497	3179	56,4	9,93	1,06	10,48
	12	a	34,76	34,5	71,63	21,56	singular (não ao longo do plano de carregamento)	2490	3170	56,3	6,80	1,05	7,17
	13	a	36,67	36,5	71,52	25,12	singular	2623	3339	57,8	7,52	1,07	8,03
	14	a	34,19	34	71,46	22,84	junção tripla não central	2443	3111	55,8	7,34	1,05	7,71
	15	a	34,46	34,4	71,31	29,04	singular	2457	3129	55,9	9,28	1,05	9,76
	16	a	34,37	34	71,38	8,88	singular	2453	3124	55,9	2,84	1,05	2,99
	17	a	37,59	37,5	71,57	17,94	singular	2690	3425	58,5	5,24	1,07	5,62
18	a	34,24	34	71,46	18,90	singular	2447	3115	55,8	6,07	1,05	6,37	
19	a	36,89	36,5	71,70	31,82	junção tripla	2645	3368	58,0	9,45	1,07	10,10	
Nº. total de provetes: 16													
a - teste axial													
i - inválido													

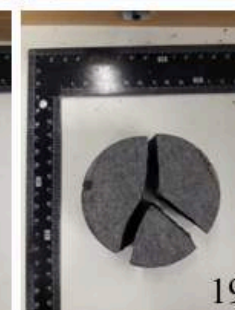
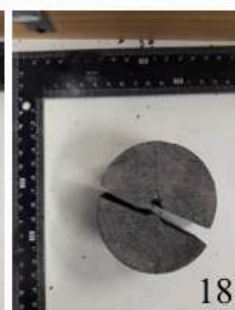
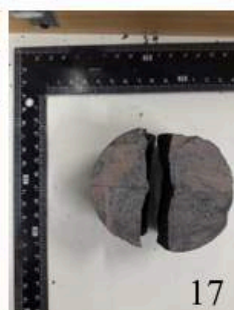
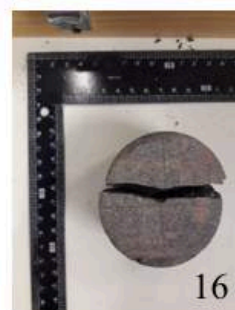
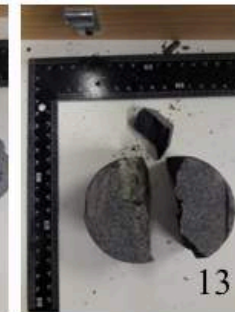
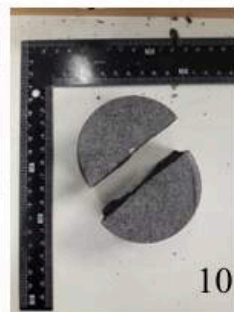
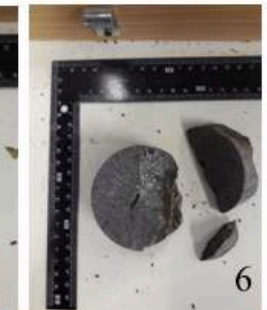
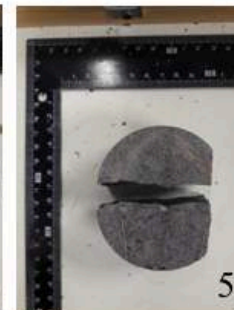
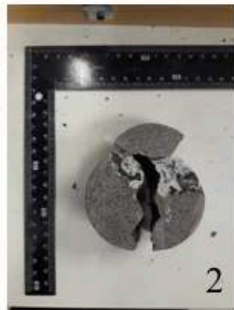


Tabela D.5 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BLA e respectivas imagens dos provetes após ensaio (grupo I)

Amostra: BLA			Condições de saturação: seco nas condições de laboratório				Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN			Data de ensaio: 5 e 6/06/2018	Todos os testes foram feitos em laboratório			
Provetes		Tipo de teste	D	D _{equipamento}	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm²)	D _e ² (mm)	D _e (mm)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)	
Grupo	n.º													
I	1	a	30,20	30,5	61,24	26,20	junção tripla	1849	2355	48,5	11,13	0,99	10,98	
	2	a	28,75	28,5	61,15	11,96	irregular	1758	2238	47,3	5,34	0,98	5,21	
	3*	a	30,36	30,5	61,18	1,20	singular	1857	2365	48,6	0,51	0,99	0,50	
	4	a	34,63	34,5	61,08	16,80	irregular	2115	2693	51,9	6,24	1,02	6,34	
	5	a	26,20	26	61,13	14,62	junção tripla	1602	2039	45,2	7,17	0,96	6,85	
	6	a	30,96	31	61,24	28,44	singular	1896	2414	49,1	11,78	0,99	11,69	
	8	a	32,74	32,5	61,20	5,10	singular	2004	2551	50,5	2,00	1,00	2,01	
	9 (i)	a	30,11	29,5	61,18	22,86	inválida	1842	2345	48,4	9,75	0,99	9,61	
	10	a	28,60	28,5	61,13	13,90	singular	1748	2226	47,2	6,24	0,97	6,08	
	12	a	33,35	33	61,02	14,66	irregular	2035	2591	50,9	5,66	1,01	5,70	
	13	a	30,96	31	61,08	8,90	irregular	1891	2408	49,1	3,70	0,99	3,67	
	14	a	31,28	31	61,28	14,32	singular	1917	2441	49,4	5,87	0,99	5,84	
	16	a	33,15	32	61,34	19,40	irregular	2033	2589	50,9	7,49	1,01	7,55	
	18	a	30,19	30	61,20	15,92	irregular	1848	2352	48,5	6,77	0,99	6,68	
	19	a	31,71	31,5	61,12	9,20	irregular	1938	2468	49,7	3,73	1,00	3,72	
	20 (i)	a	33,99	34	61,07	9,42	inválida	2076	2643	51,4	3,56	1,01	3,61	
	21* ²	a	31,28	31	61,09	7,16	irregular	1911	2433	49,3	2,94	0,99	2,92	
	22	a	33,32	33	61,15	15,30	singular	2038	2594	50,9	5,90	1,01	5,95	
	25* ³	a	26,00	26	61,07	14,38	singular	1588	2022	45,0	7,11	0,95	6,78	
	26*	a	29,21	28,5	61,01	5,28	irregular	1782	2269	47,6	2,33	0,98	2,28	
27* ²	a	31,26	31	61,09	0,78	junção tripla	1910	2431	49,3	0,32	0,99	0,32		
28	a	30,92	31	61,08	17,98	junção tripla	1889	2405	49,0	7,48	0,99	7,41		
Nº. total de provetes: 22 a - teste axial i – inválido							* fractura fechada pela qual o provete parte * ² fracturação e alteração mais proeminente no provete * ³ topos não paralelos (provetes assimétricos com D variável)							

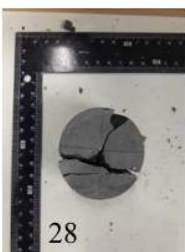
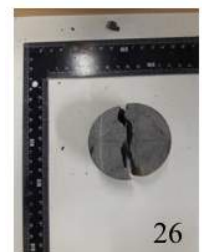
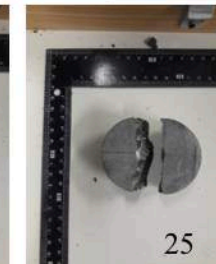
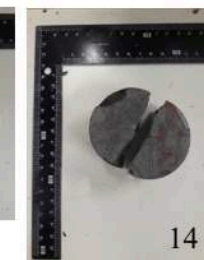
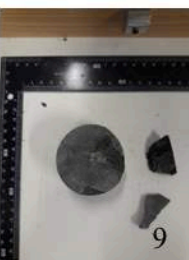
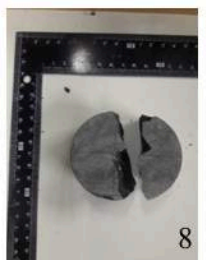
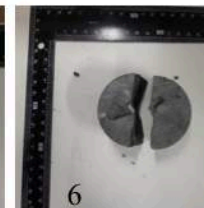
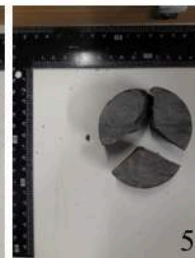
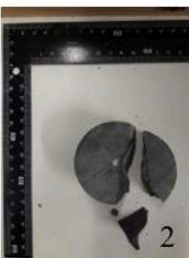
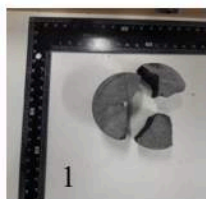


Tabela D.6 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BLA e respectivas imagens dos provetes após ensaio (grupo II)

Amostra: BLA													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN													
Data de ensaio: 5 e 6/06/2018													
Todos os testes foram feitos em laboratório													
Provetes		Tipo de teste	D	Dequipamento	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm²)	De² (mm)	De (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)
Grupo	nº.												
II	1	a	32,66	32,5	71,12	22,30	singular	2323	2957	54,4	7,54	1,04	7,83
	2	a	31,72	31	71,11	14,18	irregular	2256	2872	53,6	4,94	1,03	5,09
	3	a	33,63	33,5	70,51	18,30	singular	2371	3019	54,9	6,06	1,04	6,32
	4	a	38,91	39	70,39	24,26	singular	2739	3487	59,1	6,96	1,08	7,50
	5	a	38,09	38	71,05	33,28	singular	2706	3446	58,7	9,66	1,07	10,38
	6	a	32,50	33	70,92	10,76	irregular	2305	2935	54,2	3,67	1,04	3,80
	7	a	33,51	34	70,95	10,06	junção tripla	2378	3027	55,0	3,32	1,04	3,47
	8	a	32,66	31,5	70,69	13,06	irregular	2309	2940	54,2	4,44	1,04	4,61
	11	a	26,53	26,5	70,85	13,88	irregular	1880	2393	48,9	5,80	0,99	5,74
12	a	31,12	31	61,30	0,68	junção tripla	1908	2429	49,3	0,28	0,99	0,28	
Nº. total de provetes: 10 a - teste axial													

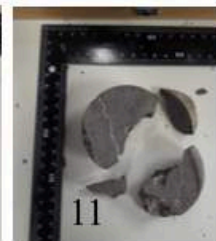
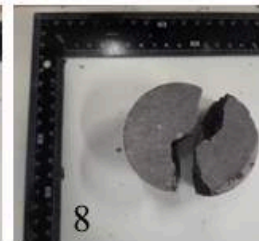
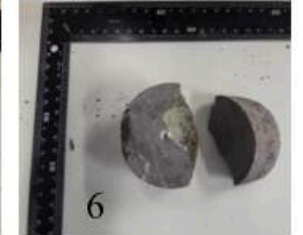
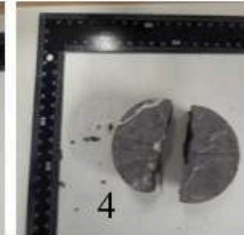
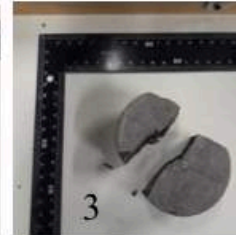
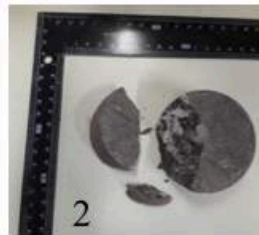
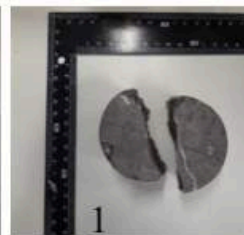


Tabela D.7 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BQ e respectivas imagens após ensaio

Amostra: BQ		Condições de saturação: seco nas condições de laboratório		Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN		Data de ensaio: 8/06/2018				Todos os testes foram feitos em laboratório			
Provete		Tipo de teste	D _{médio}	D _{equipamento}	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm ²)	D _e ² (mm)	D _e (mm)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)
Bloco	nº.												
1	1	a	28,52	28	60,05	35,44	junção tripla	1713	2181	46,7	16,25	0,97	15,76
	2	a	27,23	26,5	60,09	32,86	irregular	1636	2083	45,6	15,77	0,96	15,14
	3	a	29,19	29	60,19	40,50	singular	1757	2237	47,3	18,10	0,98	17,66
	4	a	27,91	27,5	60,11	38,46	junção tripla	1678	2136	46,2	18,00	0,97	17,38
	5	a	29,10	28,5	60,06	42,96	junção tripla	1748	2225	47,2	19,31	0,97	18,81
	6	a	27,82	27,5	60,12	33,56	singular	1673	2130	46,1	15,76	0,96	15,20
	7*	a	29,14	29	60,08	9,46	junção tripla (desviada)	1751	2229	47,2	4,24	0,97	4,14
	8	a	29,43	29	60,21	44,44	singular	1772	2256	47,5	19,70	0,98	19,25
2	9	a	28,17	28	60,09	35,60	singular	1693	2155	46,4	16,52	0,97	15,98
3	10	a	28,11	28	60,11	38,18	singular	1690	2151	46,4	17,75	0,97	17,16
	11	a	29,57	29,5	60,11	39,16	singular	1777	2263	47,6	17,30	0,98	16,92
	12	a	26,93	26,5	60,20	39,34	junção tripla	1621	2064	45,4	19,06	0,96	18,25
4	14*	a	29,93	29,5	60,22	2,08	singular (não central)	1802	2295	47,9	0,91	0,98	0,89
	15* ²	a	28,14	27	60,03	25,70	irregular	1689	2151	46,4	11,95	0,97	11,55
5	16	a	28,78	28,5	60,14	33,18	singular	1731	2204	46,9	15,06	0,97	14,63
	17	a	30,96	30	60,11	39,76	singular	1861	2370	48,7	16,78	0,99	16,58
	18	a	25,48	25	60,18	34,80	singular	1533	1952	44,2	17,82	0,95	16,86
	19	a	30,66	30,5	60,13	37,56	singular	1844	2347	48,4	16,00	0,99	15,78
	20	a	29,33	29,5	60,18	34,72	singular	1765	2247	47,4	15,45	0,98	15,08
Nº. total de provetes: 19 a - teste axial							* fractura fechada pela qual o provete parte * ² topos não paralelos (proвете assimétrico com D variável)						

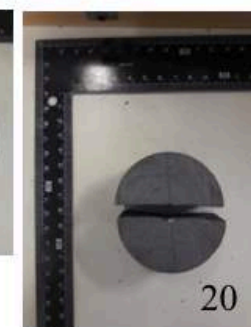
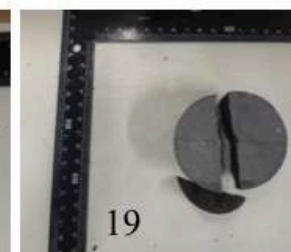
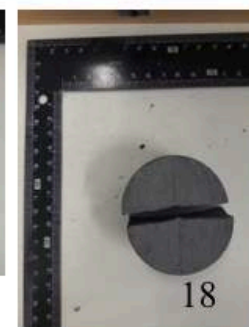
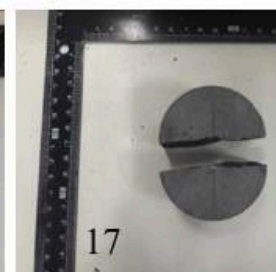
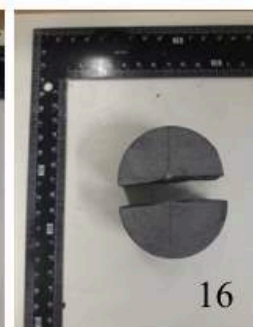
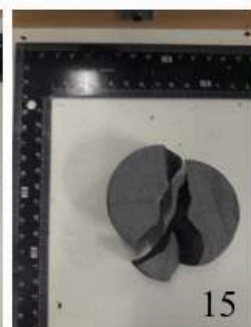
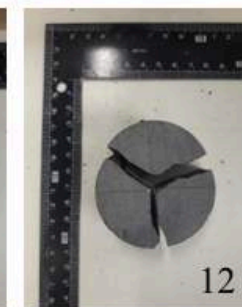
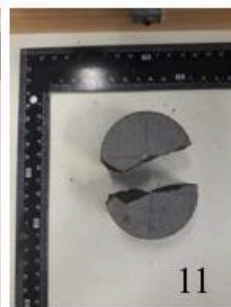
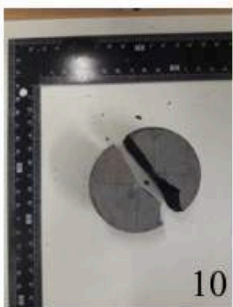
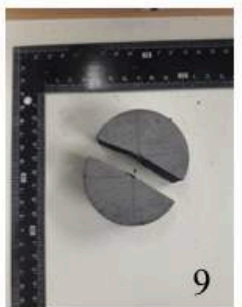
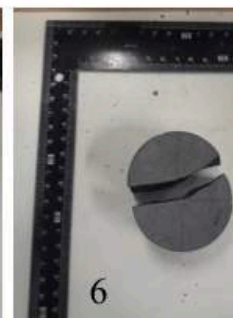
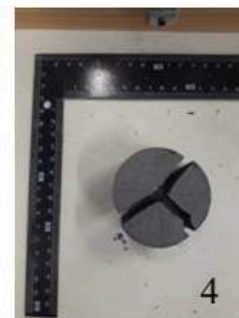
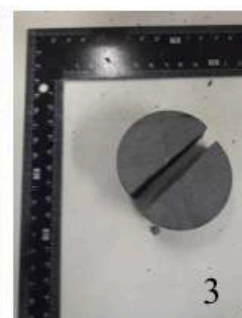
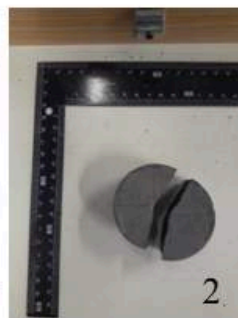


Tabela D.8 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BM e respectivas imagens dos provetes após rotura

Amostra: BM_ponto1													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN													
Data de ensaio: 3/07/2018													
Todos os testes foram feitos em laboratório													
Provete		Tipo de teste	D _{médio}	D _{equipamento}	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm ²)	D _e ² (mm)	D _e (mm)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)
Bloco	nº.												
1	1	a	30,64	30	60,11	37,86	singular	1842	2345	48,43	16,14	0,99	15,91
	2	a	27,04	27	60,18	35,50	irregular	1627	2072	45,52	17,13	0,96	16,43
2	3*	a	26,56	26,5	60,41	12,02	singular	1604	2043	45,20	5,88	0,96	5,62
	4*	a	30,68	30	60,23	13,50	singular	1848	2353	48,51	5,74	0,99	5,66
	5	a	30,86	30,5	60,16	37,50	irregular	1857	2364	48,62	15,86	0,99	15,67
	6	a	25,25	25	60,34	32,14	junção tripla	1524	1940	44,04	16,57	0,94	15,65
	7	a	27,30	26,5	60,24	33,60	singular	1645	2094	45,76	16,05	0,96	15,42
	8	a	29,19	29	60,24	33,22	singular	1758	2239	47,32	14,84	0,98	14,47
	9	a	25,02	24,5	60,38	35,54	múltipla	1511	1923	43,86	18,48	0,94	17,42
4	10	a	27,03	26,5	59,97	31,80	singular	1621	2064	45,43	15,41	0,96	14,76
	11	a	29,20	29	60,17	32,22	singular	1757	2237	47,30	14,40	0,98	14,05
Nº. total de provetes: 11 a - teste axial							* fractura pré-existente pela qual o provete parte						



BM

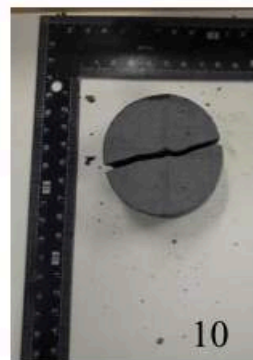
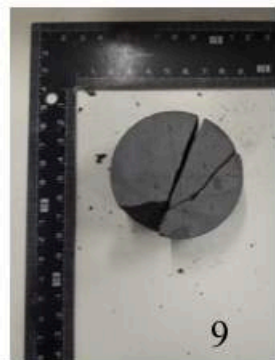
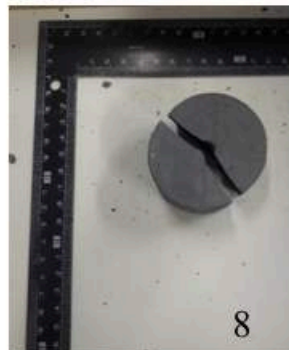
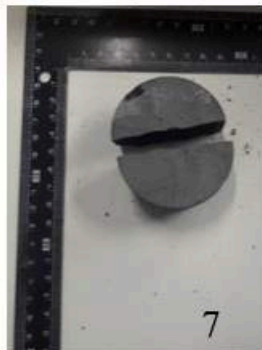
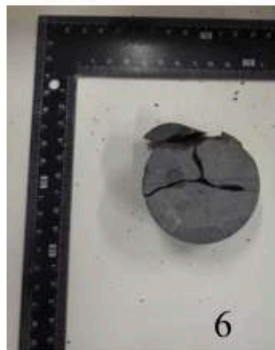
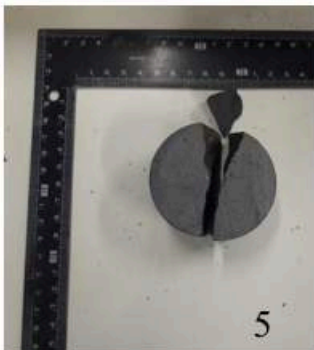
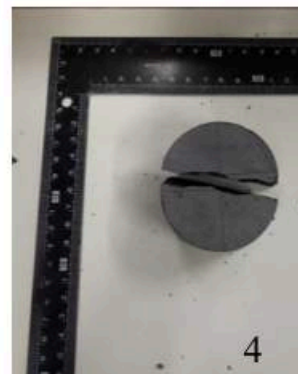
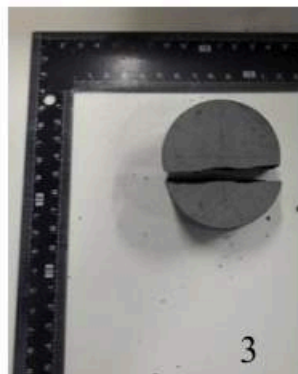
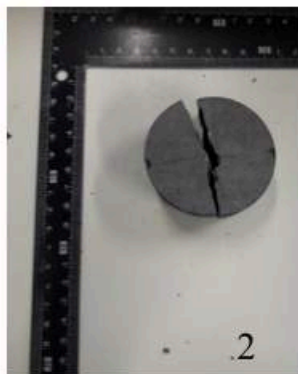
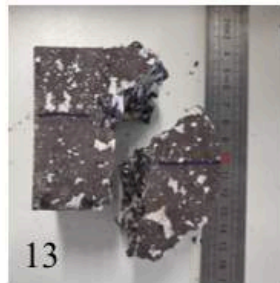
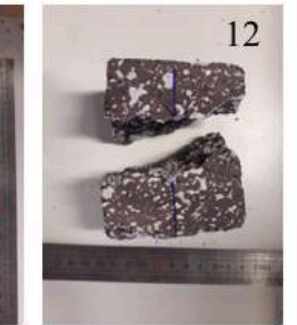
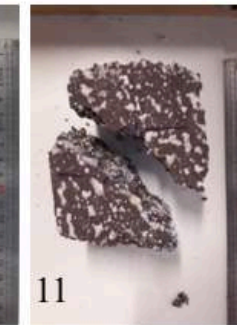
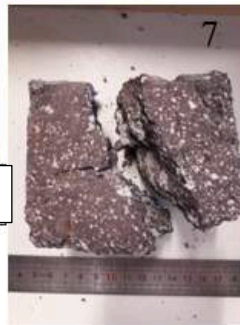
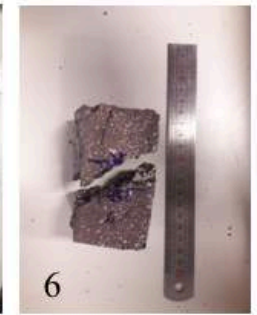
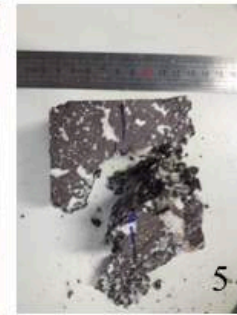
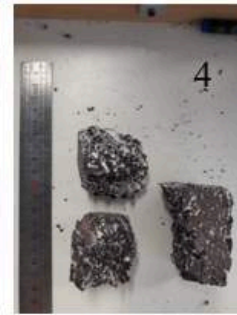
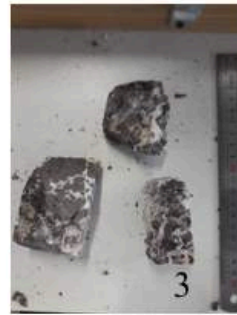
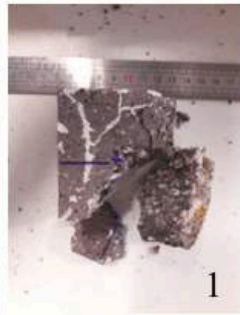


Tabela D.9 Resultados obtidos no ensaio de RCP para a amostra BA e respectivas imagens dos provetes após rotura

Amostra BA													
Condições de saturação: seco nas condições de laboratório													
Equipamento: MATEST com capacidade 56 kN													
Data de ensaio: 1/06/2018 e 4/06/2018													
Todos os testes foram feitos em laboratório													
Proвете		Tipo de teste	D _{médio}	D _{equipamento}	W (mm)	P (kN)	Tipo de rotura	A (mm ²)	D _e ² (mm)	D _e (mm)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)
Bloco	nº.												
1	1	i	57,58	56,50	59,34	1,42	irregular	3417	4350	66,0	0,33	1,13	0,37
	2	i	67,60	66,50	63,58	0,94	junção tripla	4298	5472	74,0	0,17	1,19	0,20
	3	i	56,56	55,00	56,44	2,96	junção tripla	3192	4064	63,8	0,73	1,12	0,81
2	4	i	48,20	48,00	59,46	1,24	junção tripla	2866	3649	60,4	0,34	1,09	0,37
	5	i	54,44	54,00	57,27	1,60	irregular	3118	3970	63,0	0,40	1,11	0,45
	6 *	i	61,00	60,00	52,74	4,58	singular	3217	4096	64,0	1,12	1,12	1,25
	7	i	59,90	59,00	68,62	2,78	irregular	4110	5233	72,3	0,53	1,18	0,63
	8	i	46,80	46,00	64,61	1,36	singular	3024	3850	62,0	0,35	1,10	0,39
	9	i	53,16	52,50	54,64	4,48	junção tripla	2905	3698	60,8	1,21	1,09	1,32
	10	i	62,63	62,00	60,62	3,94	singular	3797	4834	69,5	0,82	1,16	0,95
	11	i	53,24	52,00	61,56	3,02	singular	3277	4173	64,6	0,72	1,12	0,81
	12	i	53,12	52,50	63,21	4,22	singular	3358	4275	65,4	0,99	1,13	1,11
	13	i	53,17	52,00	60,19	3,01	irregular	3200	4075	63,8	0,74	1,12	0,82
3	14	i	52,50	52,00	67,36	1,84	irregular	3536	4503	67,1	0,41	1,14	0,47
	15	i	50,76	50,50	57,29	1,78	junção tripla	2908	3703	60,8	0,48	1,09	0,53
	16	i	49,62	49,00	65,74	2,54	irregular	3262	4153	64,4	0,61	1,12	0,69
	17	i	58,32	58,00	55,46	1,04	irregular	3234	4118	64,2	0,25	1,12	0,28
	18	i	46,86	46,00	54,89	1,76	singular	2572	3275	57,2	0,54	1,06	0,57
	19	a	56,51	56,50	61,28	2,08	singular	3463	4409	66,4	0,47	1,14	0,54
	20 *	i	67,73	67,00	54,20	1,14	singular	3671	4674	68,4	0,24	1,15	0,28
	21	i	58,31	58,00	64,73	2,04	irregular	3774	4806	69,3	0,42	1,16	0,49
	22	i	59,74	59,50	63,20	1,36	singular	3776	4807	69,3	0,28	1,16	0,33

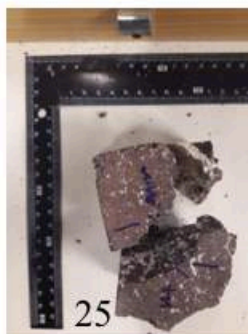
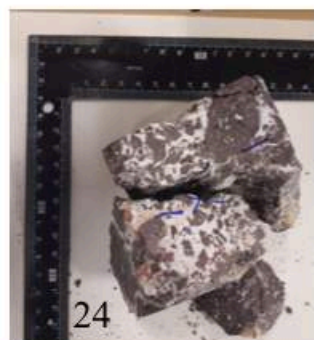
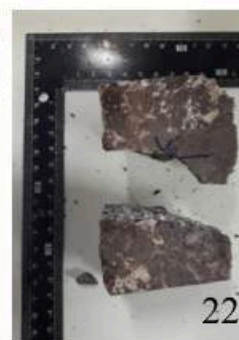
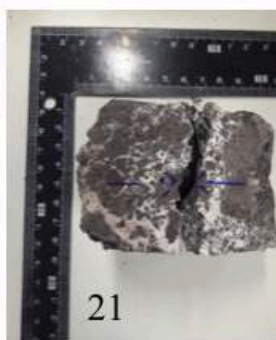
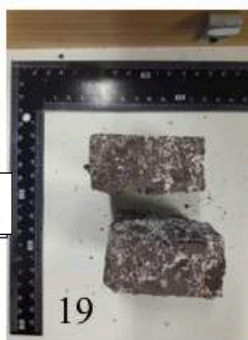
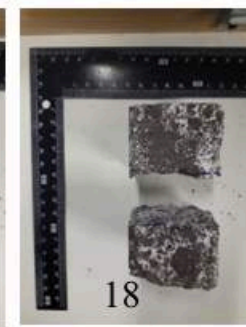
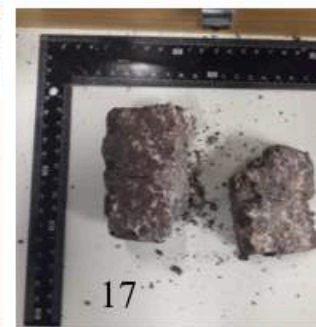
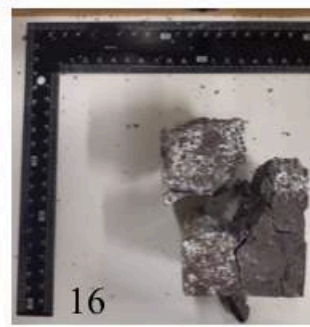
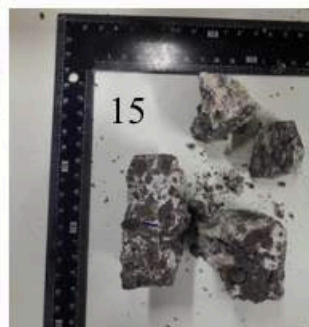
4	23	i	57,78	57,00	82,58	3,08	singular	4771	6075	77,9	0,51	1,22	0,62
	24	i	67,25	66,50	74,74	1,08	irregular	5026	6400	80,0	0,17	1,24	0,21
	25	i	56,98	57,00	61,86	1,26	irregular	3525	4488	67,0	0,28	1,14	0,32
	26	i	66,68	67,00	67,99	3,28	singular	4534	5772	76,0	0,57	1,21	0,69
5	27	i	50,87	50,50	64,86	3,08	singular	3299	4201	64,8	0,73	1,12	0,82
	28	i	56,84	57,00	64,10	3,34	irregular	3643	4639	68,1	0,72	1,15	0,83
	29	i	55,12	55,00	60,01	4,48	singular	3308	4212	64,9	1,06	1,12	1,20
	30	i	60,76	60,50	63,22	3,70	singular	3841	4891	69,9	0,76	1,16	0,88
	31	i	56,33	56,00	61,22	3,36	singular	3449	4391	66,3	0,77	1,14	0,87
	32	i	57,94	57,00	64,69	2,84	singular	3748	4772	69,1	0,60	1,16	0,69
	33	i	48,97	48,50	58,40	1,64	singular	2860	3641	60,3	0,45	1,09	0,49
	34	i	53,42	53,00	57,18	3,64	irregular	3055	3889	62,4	0,94	1,10	1,03
	35	i	59,02	59,00	63,49	6,06	singular	3747	4771	69,1	1,27	1,16	1,47
6	36	i	56,84	57,00	59,51	4,58	irregular	3383	4307	65,6	1,06	1,13	1,20
	37	i	56,22	55,50	57,92	4,40	singular	3256	4146	64,4	1,06	1,12	1,19
	38	i	60,34	60,00	59,82	3,48	singular	3610	4596	67,8	0,76	1,15	0,87
	39	i	53,18	53,00	61,14	4,56	irregular	3251	4140	64,3	1,10	1,12	1,23
	40	i	58,63	58,50	58,34	2,68	junção tripla	3420	4355	66,0	0,62	1,13	0,70
7	41	i	66,08	65,50	67,81	0,74	irregular	4481	5705	75,5	0,13	1,20	0,16
	42	i	67,90	67,50	68,57	1,04	irregular	4656	5928	77,0	0,18	1,21	0,21
	43	i	57,93	58,00	58,28	0,68	singular	3376	4299	65,6	0,16	1,13	0,18

Nº. total de provetes: 41 visto que * não cumprem os requisitos da dimensão
i – teste em blocos irregulares



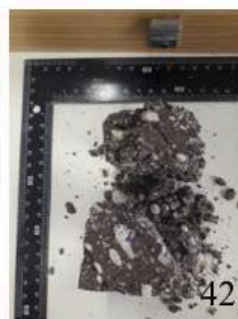
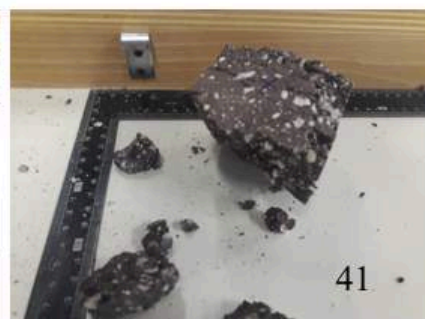
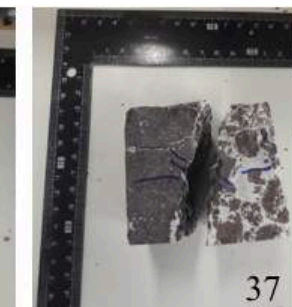
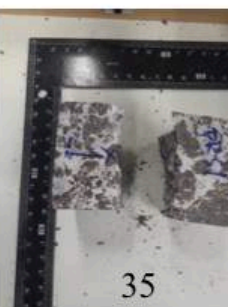
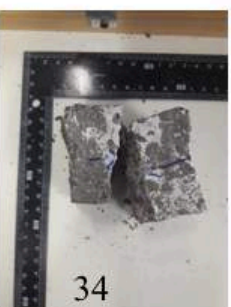
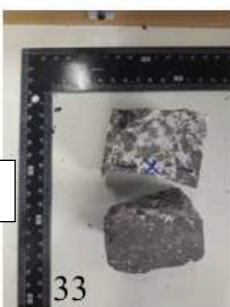
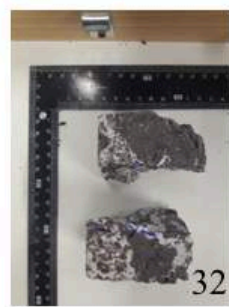
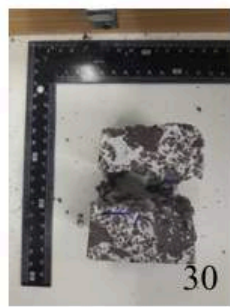
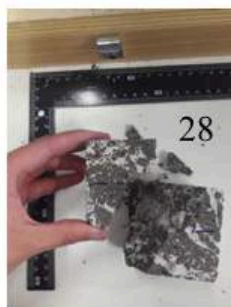


BA





BA

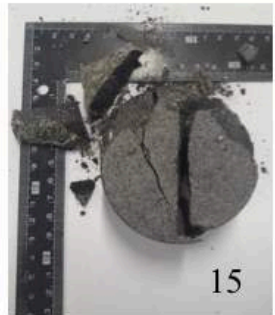
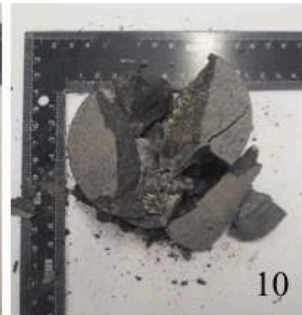


D.3 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO INDIRECTA

Tabela D.10 Resultados obtidos no ensaio de RTB para a amostra BLV e respectivas imagens dos provetes após rotura (grupo I e II)

Amostra: BLV											
Data de ensaio: 21/06/2018 (ensaio para determinação de w até 22/06/2018)											
Equipamento de ensaio: prensa FORM + TEST SEIDNER da Perta; prensa ZWICK/Z050 para provetes com D > 80mm											
Taxa de carregamento: 2,6; 1,2 mm/min para II.a 8, 9 e 10; 0,6 mm/min para II.b 2 e 0,4 mm/min para II.b 3											
								Condições de saturação			
Proвете		h _{médio} (mm)	D _{médio} (mm)	t(s)	P (kN)	“Taxa de carregamento” média (MPa/s)	Tipo de rotura	σ _t (MPa)	m _w (g)	m _d (g)	w (%)
Grupo	nº.										
I	1	38,2	71,7	152	165,5	0,25	múltipla central	38,47	83,17	82,46	0,86
	2	32,9	71,6	169	137	0,22	múltipla central	37,02	94,50	92,86	1,77
	3	35,5	71,4	104	80	0,19	múltipla central	20,09	85,21	82,88	2,81
	4	35,8	71,6	179	159	0,22	múltipla central	39,49	161,27	159,30	1,24
	5	33,5	71,3	172	166,5	0,26	múltipla central + não central	44,38	79,24	78,67	0,72
	6	36,6	71,6	240	134	0,14	múltipla central + não central	32,55	76,16	75,11	1,40
	7	36,3	71,7	166	140,5	0,21	múltipla central	34,37	57,67	56,55	1,98
	8*	34,1	71,7	154	137	0,23	não central (x2)	35,67	118,19	114,31	3,39
	10	34,3	71,6	88	134	0,39	múltipla central + não central	34,74	90,33	88,99	1,51
	15	37,0	71,8	98	88,5	0,22	múltipla central + não central	21,21	99,30	97,86	1,47
	16	34,7	71,6	206	117	0,15	múltipla central + não central	29,98	159,81	157,10	1,73
	17	38,2	71,6	183	174,5	0,22	múltipla central	40,62	103,52	101,58	1,91
	18	34,3	71,8	176	166,5	0,24	múltipla central + não central	43,04	104,75	103,20	1,50
	19	35,5	71,9	124	168	0,34	múltipla central + não central	41,90	66,74	66,08	1,00
Nº. total de provetes: 14											
*ligeira fracturação a meio do ensaio explicando a maior porosidade face aos restantes											
II.a	3	35,8	70,8	115	72	0,16	não central + central	18,08	77,58	76,85	0,95
	4	35,7	70,9	127	102,5	0,20	múltipla central + não central	25,78	60,59	59,80	1,32

	5	38,0	70,9	114	113	0,23	múltipla central	26,70	100,40	99,30	1,11
	6	35,6	70,8	122	128,5	0,27	múltipla central + não central	32,46	79,11	77,83	1,64
	7	37,7	70,9	176	46	0,06	múltipla central + não central	10,96	59,71	58,70	1,72
	8	42,6	83,0	172	28,64	0,03	não central	5,16	183,83	177,08	3,81
	9	39,0	83,0	115	22,63	0,04	não central (x2)	4,45	115,32	111,75	3,19
	10	37,3	82,8	84	9,64	0,02	não central	1,99	120,40	115,84	3,94
	13	35,3	71,4	155	49,5	0,08	múltipla central (+central pela fractura)	12,50	112,20	110,78	1,28
II.b	1	35,7	71,4	193	51,5	0,07	múltipla central	12,86	117,25	113,18	3,60
	2	42,1	83,6	280	21,87	0,01	central + não central	3,96	130,95	125,49	4,35
	5	41,8	83,7	280	6,69	0,00	múltipla central + não central (segue a fractura)	1,22	130,38	126,89	2,75
Nº. total de provetes: 12											



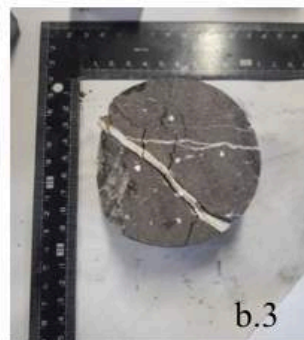
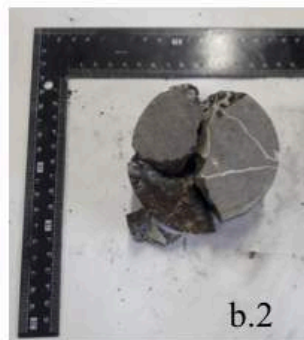
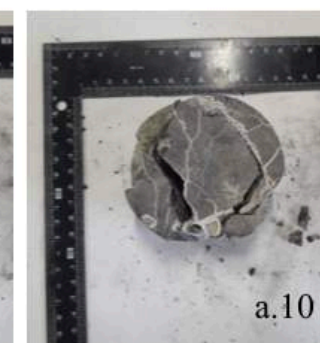
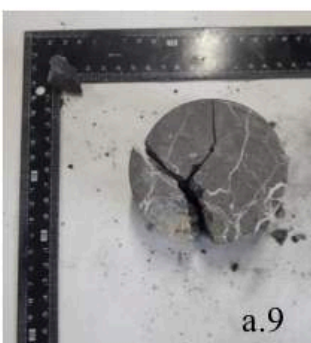
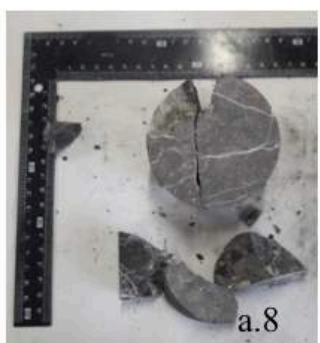
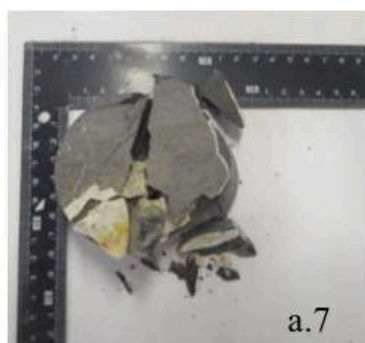
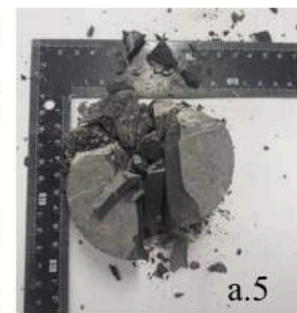
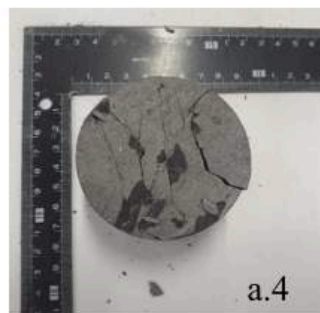
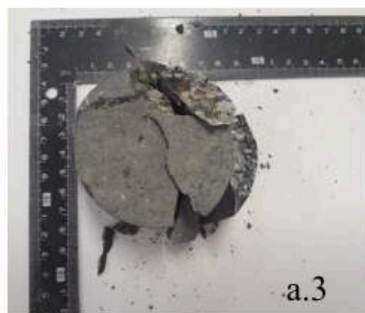
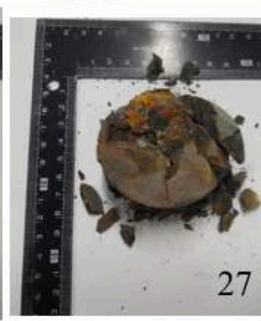
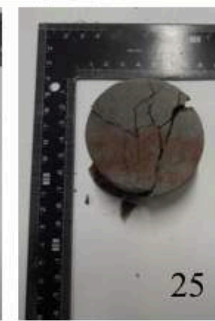
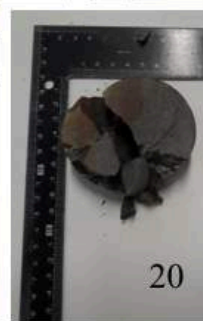
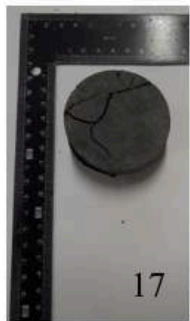
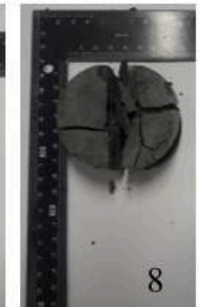
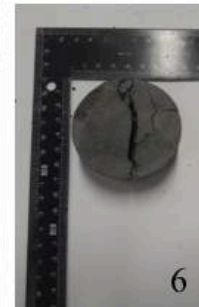


Tabela D.11 Resultados obtidos no ensaio de RTB para a amostra BLA e respectivas imagens dos provetes após rotura (grupo I e II)

Amostra: BLA											
Data de ensaio: 21/06/2018 (ensaio para determinação de w até 22/06/2018)											
Equipamento de ensaio: prensa FORM + TEST SEIDNER da Perta											
Taxa de carregamento: 2,8 para o provete I.1 e todos de II; 2,7 para restantes I e para II.1 e 2											
									Condições de saturação		
Proвете		h _{médio} (mm)	D _{médio} (mm)	t(s)	P (N)	“Taxa de carregamento média” (MPa/s)	Tipo de rotura	σ_t (MPa)	m _w (g)	m _d (g)	w (%)
Grupo	n°.										
I	1	31,9	61,0	108	19,5	0,06	múltipla central + não central	6,38	71,67	70,03	2,34
	2	29,1	60,9	145	28	0,07	múltipla central + não central	10,06	83,92	82,20	2,09
	3	27,4	61,2	86	43	0,19	múltipla central	16,32	83,20	81,53	2,05
	4	32,5	61,1	121	59,5	0,16	múltipla central + não central	19,08	74,29	73,66	0,86
	6	28,3	61,3	65	28	0,16	múltipla central + não central	10,28	82,43	80,67	2,18
	7	33,9	61,3	109	52,5	0,15	central + não central	16,08	59,27	58,01	2,17
	8	29,2	61,3	89	38	0,15	múltipla central (+ central)	13,52	55,92	54,71	2,21
	9	32,2	61,3	95	34	0,12	central + não central	10,97	68,78	67,35	2,12
	10	28,3	61,1	99	22	0,08	múltipla não central	8,10	53,66	52,68	1,86
	11	30,6	61,1	92	30,5	0,11	central	10,39	97,26	96,07	1,24
	12	28,4	61,0	87	27	0,11	múltipla central	9,92	74,64	72,85	2,46
	13	30,7	61,1	62	19	0,10	múltipla central + não central	6,45	59,52	58,24	2,20
	14	29,1	61,2	98	38,5	0,14	múltipla central	13,76	85,15	83,20	2,34
	16	28,7	61,1	58	27,5	0,17	central + não central	9,98	63,33	61,84	2,41
	17	28,2	61,0	65	20	0,11	múltipla não central	7,40	88,75	86,86	2,18
	18	30,6	61,0	113	24,5	0,07	central + não central	8,36	92,79	90,71	2,29
	19	33,4	61,1	68	23	0,11	múltipla central	7,17	60,93	59,66	2,13
	20	30,1	61,0	72	16	0,08	múltipla central + não central	5,55	97,06	94,93	2,24
	23	27,0	61,2	66	31	0,18	múltipla central	11,94	80,10	78,52	2,01
	25	30,1	61,2	103	18,5	0,06	múltipla central + não central	6,39	76,36	74,76	2,14

	27*	31,8	61,3	319	26	0,03	múltipla central + não central	8,49	47,13	45,95	2,57
Nº. total de provetes: 21											
*acomoda elevada deformação antes de fracturar											
II	1	31,0	70,9	125	40,5	0,09	central + não central	11,73	81,97	80,11	2,32
	2*	26,2	70,3	79	34,5	0,15	não central	11,92	183,80	179,68	2,29
	3*	27,7	71,1	86	26,5	0,10	central + não central	8,57	110,18	107,09	2,89
	4	35,5	71,1	81	78	0,24	múltipla central + não central	19,67	83,53	81,43	2,58
	5	33,6	70,8	74	46	0,17	múltipla não central	12,31	81,88	79,67	2,77
	6	32,7	70,9	123	57	0,13	múltipla central + não central	15,65	52,45	51,00	2,84
	7	32,5	71,1	109	44,5	0,11	múltipla central + não central	12,26	76,43	74,34	2,81
	8	32,4	70,8	62	54	0,24	múltipla central + não central	14,99	89,52	86,89	3,03
	9**	34,6	69,8	72	19	0,07	múltipla central + não central	5,01	40,50	39,15	3,45
	11***	30,4	61,1	189	10,5	0,02	múltipla central + não central	3,60	116,16	112,61	3,15
	12	29,6	61,1	77	17	0,08	múltipla central + não central	5,98	81,37	79,23	2,70
Nº total de provetes: 11											
*dimensão menos apropriada (não cumpre aproximadamente 1/2D)											
**provete irregular e com faces não paralelas											
*** acomoda elevada deformação antes de fracturar; não se conseguiu um fragmento com massa superior a 50 g											



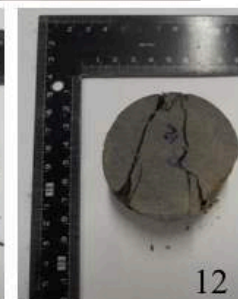
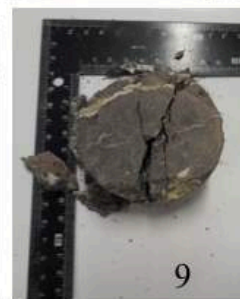
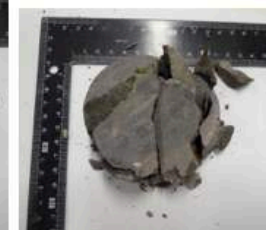
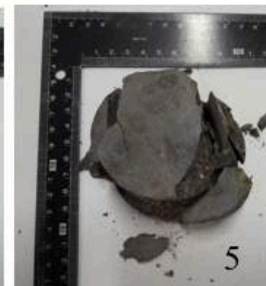
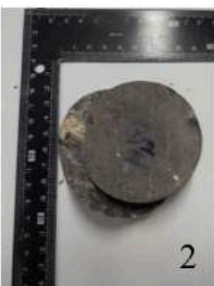


Tabela D.12 Resultados obtidos no ensaio de RTB para a amostra BQ e respectivas imagens dos provetes após rotura

Amostra: BQ											
Data de ensaio: 20/06/2018 (ensaio para determinação de w até 21/06/2018)											
Equipamento de ensaio: prensa FORM + TEST SEIDNER da Perta											
Taxa de carregamento: 2,8											
								Condições de saturação			
Provete		h _{médio} (mm)	D _{médio} (mm)	t(s)	P (kN)	“Taxa de carregamento média” (MPa/s)	Tipo de rotura	σ _t (MPa)	m _w (g)	m _d (g)	w (%)
Bloco	nº.										
1	1	25,3	60,1	95	68	0,30	múltipla central	28,47	80,30	80,05	0,31
	3	24,6	60,0	107	72,5	0,29	múltipla central	31,27	76,48	76,31	0,22
	4	29,4	60,2	164	65,5	0,14	múltipla central	23,56	127,03	126,76	0,21
	5	28,4	60,0	165	66,5	0,15	múltipla central	24,84	95,97	95,67	0,31
	6	30,0	60,0	145	71,5	0,17	múltipla central + não central	25,29	101,93	101,63	0,30
	7	29,7	60,1	87	73	0,30	múltipla central + não central	26,04	64,46	64,33	0,20
	8	28,4	60,2	97	54,5	0,21	central + não central	20,29	76,67	76,49	0,24
2	9	26,0	60,2	142	66,5	0,19	múltipla central + não central	27,05	91,30	91,10	0,22
	10	27,6	60,1	106	45	0,16	múltipla central+ não central	17,27	95,14	94,35	0,84
3	11	27,8	60,2	110	70	0,24	múltipla central + não central	26,63	95,43	95,18	0,26
	12	27,6	60,3	93	58	0,24	múltipla central	22,19	65,51	65,33	0,28
4	13	29,9	60,1	81	47	0,21	múltipla central + não central	16,65	109,01	108,76	0,23
	14	27,4	60,1	86	48,5	0,22	múltipla central + não central	18,75	70,42	70,22	0,28
5	16	25,9	60,1	85	58,5	0,28	múltipla central + não central	23,93	52,17	51,93	0,46
	17*	20,8	60,1	103	49,5	0,24	múltipla central + não central	25,21	61,68	61,48	0,33
	18	28,8	60,3	94	53	0,21	múltipla central + não central	19,43	96,93	96,68	0,26
	19	25,3	60,1	94	80	0,36	múltipla central	33,49	82,22	81,81	0,50
	20	24,6	60,0	81	70	0,37	múltipla central	30,19	69,41	69,12	0,42

Nº. total de provetes: 18
 *dimensão não cumpre aproximadamente 1/2D

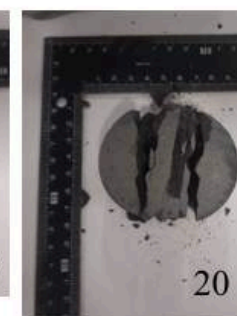
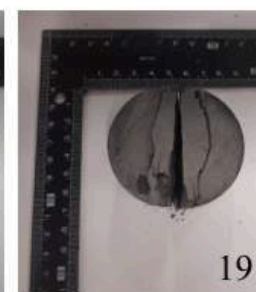
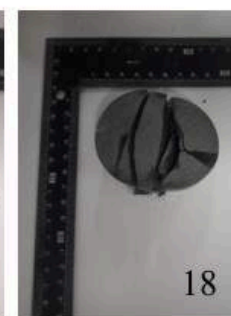
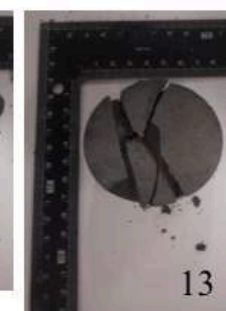
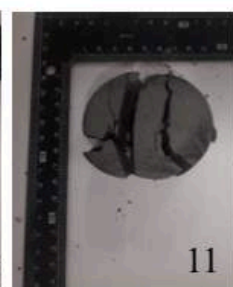
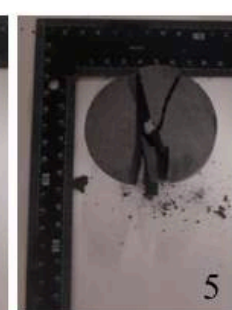
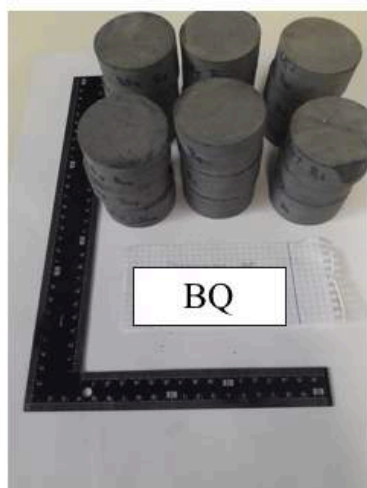
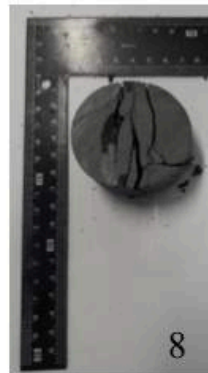
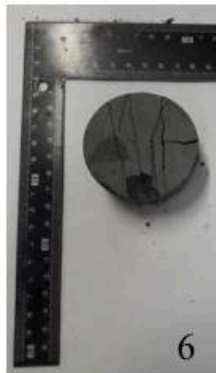
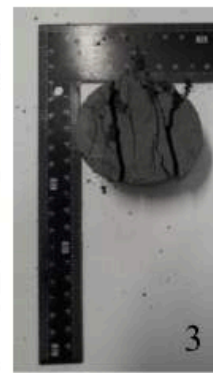
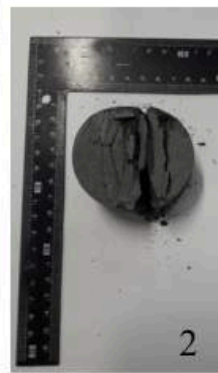
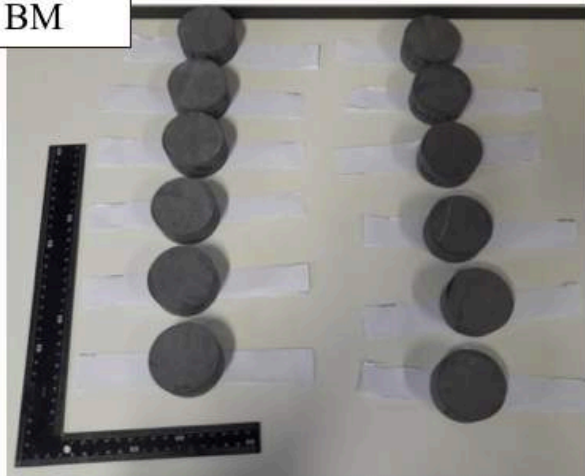


Tabela D.13 Resultados obtidos no ensaio de RTB para a amostra BM e respectivas imagens após rotura

Amostra: BM											
Data de ensaio: 3/07/2018 (ensaio para determinação de w até 4/07/2018)											
Equipamento de ensaio: prensa FORM + TEST SEIDNER da Perta											
Taxa de carregamento: 2,8											
									Condições de saturação		
Provete		h _{médio} (mm)	D _{médio} (mm)	t(s)	P (kN)	“Taxa de carregamento média” (MPa/s)	Tipo de rotura	σ _t (MPa)	m _w (g)	m _d (g)	w (%)
Bloco	nº.										
1	1	28,2	60,3	118	51,5	0,16	múltipla central + não central	19,28	79,37	79,19	0,23
	2	29,5	60,2	167	96	0,21	múltipla central	34,41	77,94	77,72	0,28
	3	28,7	60,3	114	91	0,29	múltipla central	33,48	60,70	60,45	0,41
2	4*	26,4	60,2	192	86	0,18	múltipla central + não central	34,45	44,40	44,22	0,41
	5	28,0	60,2	131	62,5	0,18	múltipla central	23,61	74,28	74,06	0,30
	6	29,9	60,2	374	74	0,07	múltipla central	26,17	87,48	87,28	0,23
	7	28,0	60,2	86	80,5	0,35	múltipla central + não central	30,40	61,64	61,56	0,13
	8	27,0	60,2	70	67,5	0,38	múltipla central + não central	26,44	79,10	78,89	0,27
	9	29,4	60,2	164	124	0,27	múltipla central + não central	44,60	68,03	67,74	0,43
4	10	27,4	60,3	121	116,5	0,37	múltipla central	44,89	54,43	54,19	0,44
	11	28,2	60,2	246	102,5	0,16	múltipla central + não central	38,44	50,66	50,55	0,22
	12	27,4	60,0	92	67,5	0,28	múltipla central + não central	26,14	59,19	58,97	0,37

Nº. total de provetes: 12
 * não foi possível obter um fragmento com massa superior a 50 g

BM



E. DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO BASÁLTICO DE VIALONGA

Tabela E.1 Tabelas com legenda das classes dos histogramas para cada característica de diaclase

Espaçamento(mm)				
Muito próximas	Próximas	Medianamente espaçadas	Afastadas	Muito afastadas
20-60	60-200	200-600	600-2000	>2000
1	2	3	4	5

Continuidade (m)				
Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
<1	1-3	3-10	10-20	>20
1	2	3	4	5

Abertura (mm)								
Muito Apertada	Apertada	Parcialmente Aberta	Aberta	Moderadamente Aberta	Larga	Muito Larga	Extremamente Larga	Cavernosa
<0.1	0.1 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 2.5	2.5 - 10	>10	10 - 100	100 - 1000	>1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Rugosidade (JRC)									
0 - 2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabela E.2 Histogramas de algumas características da família de descontinuidades F1

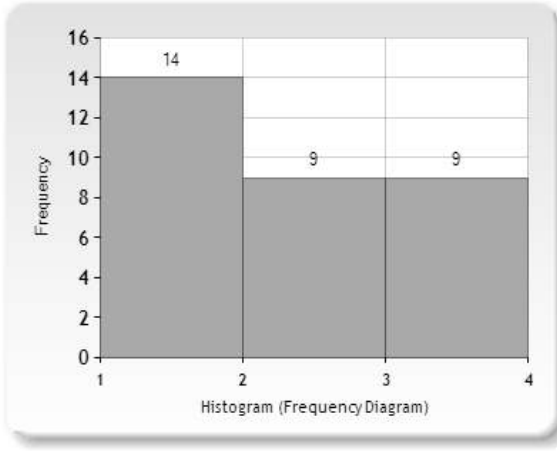
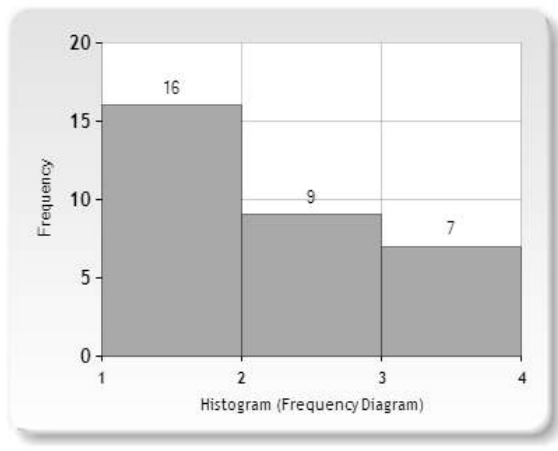
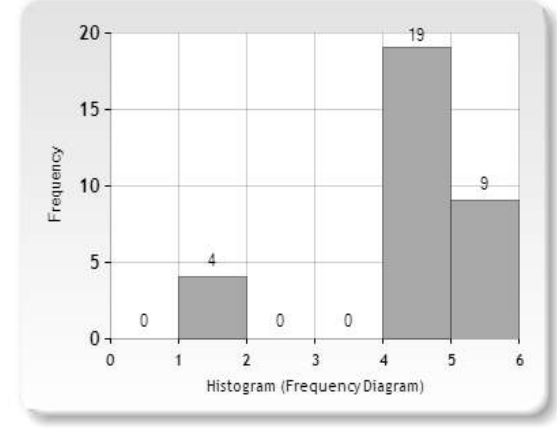
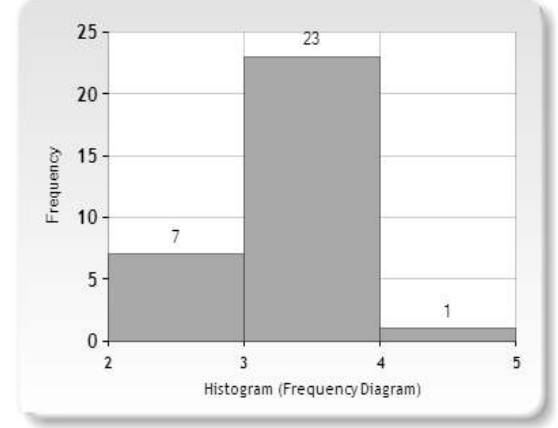
F1																							
Espaçamento	Continuidade																						
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	14	2	9	3	9	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	16	2	9	3	7						
Category	Frequency																						
1	14																						
2	9																						
3	9																						
Category	Frequency																						
1	16																						
2	9																						
3	7																						
Abertura	JRC																						
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	0	0	1	4	2	0	3	0	4	19	5	9	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	2	7	3	23	4	1
Category	Frequency																						
0	0																						
1	4																						
2	0																						
3	0																						
4	19																						
5	9																						
Category	Frequency																						
2	7																						
3	23																						
4	1																						

Tabela E.3 Histogramas de algumas características da família de descontinuidades F2

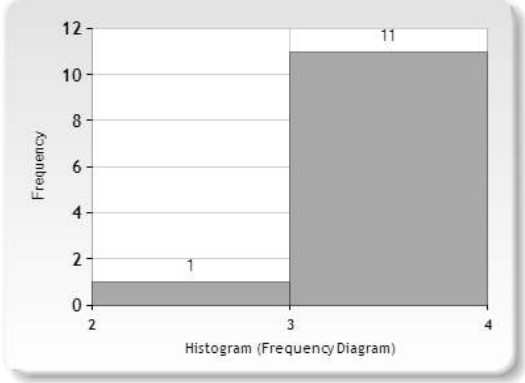
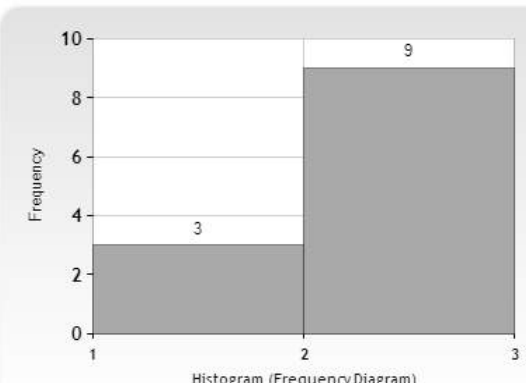
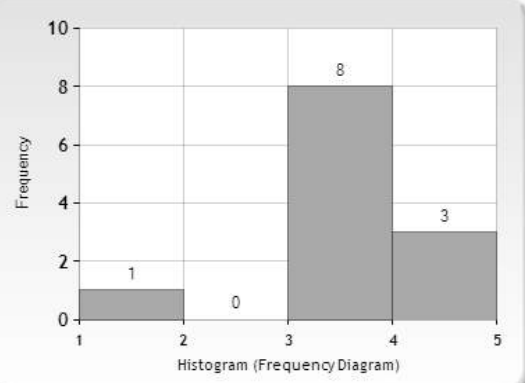
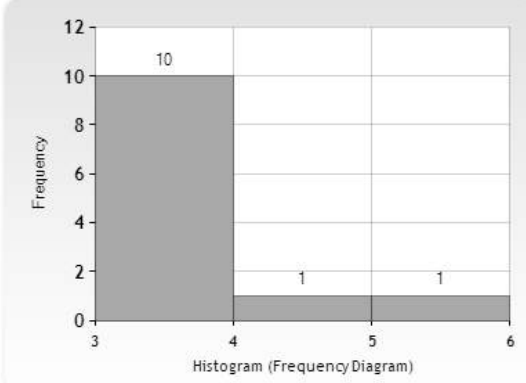
F2																			
Espaçamento	Continuidade																		
 <p>Frequency</p> <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>11</td> </tr> </tbody> </table>	Value	Frequency	2	1	3	11	 <p>Frequency</p> <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	Value	Frequency	1	3	2	9						
Value	Frequency																		
2	1																		
3	11																		
Value	Frequency																		
1	3																		
2	9																		
Abertura	JRC																		
 <p>Frequency</p> <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Value	Frequency	1	1	2	0	3	8	4	3	 <p>Frequency</p> <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Value	Frequency	3	10	4	1	5	1
Value	Frequency																		
1	1																		
2	0																		
3	8																		
4	3																		
Value	Frequency																		
3	10																		
4	1																		
5	1																		

Tabela E.4 Histogramas de algumas características da família de descontinuidades F3

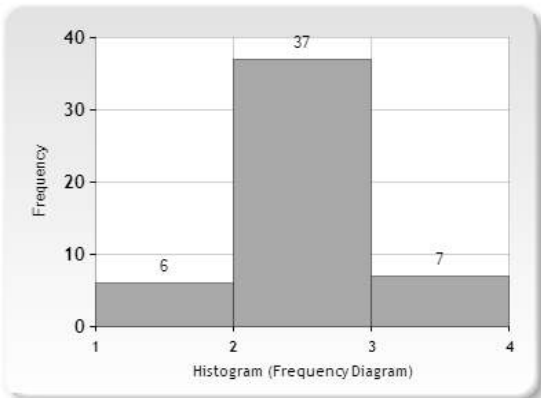
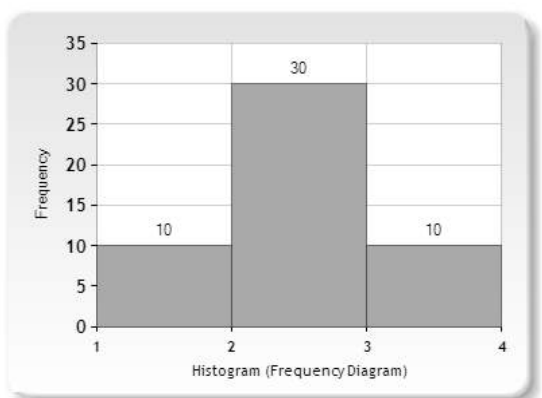
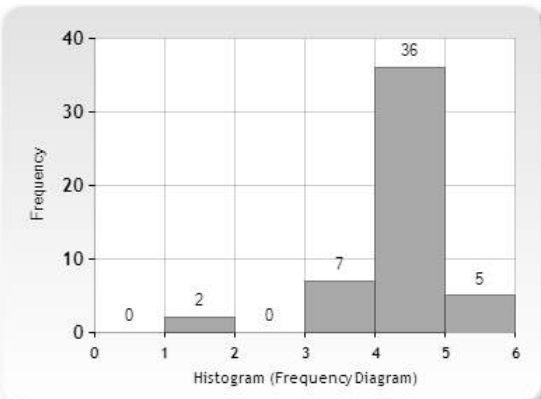
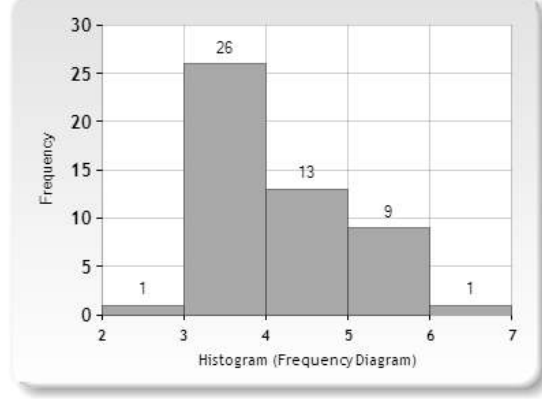
F3																											
Espaçamento	Continuidade																										
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	6	2	37	3	7	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	10	2	30	3	10										
Category	Frequency																										
1	6																										
2	37																										
3	7																										
Category	Frequency																										
1	10																										
2	30																										
3	10																										
Abertura	JRC																										
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	0	0	1	2	2	0	3	7	4	36	5	5	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	2	1	3	26	4	13	5	9	6	1
Category	Frequency																										
0	0																										
1	2																										
2	0																										
3	7																										
4	36																										
5	5																										
Category	Frequency																										
2	1																										
3	26																										
4	13																										
5	9																										
6	1																										

Tabela E.5 Histogramas de algumas características da família de descontinuidades F4

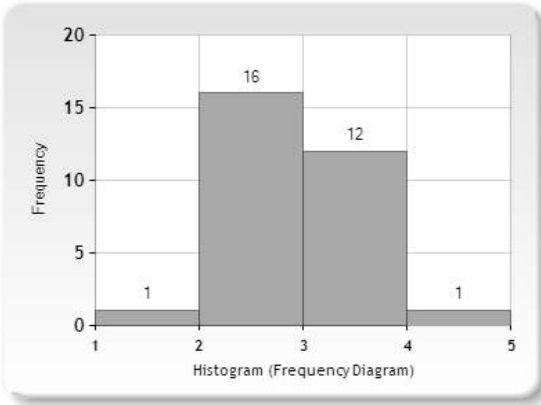
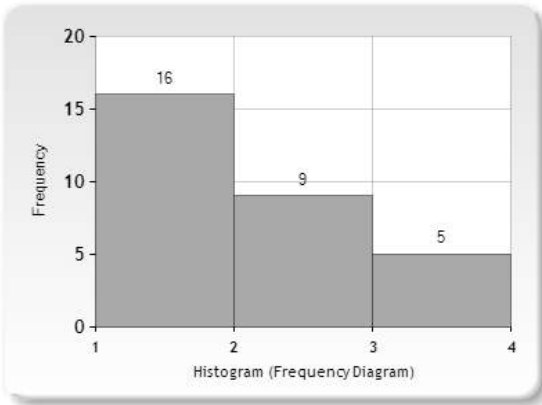
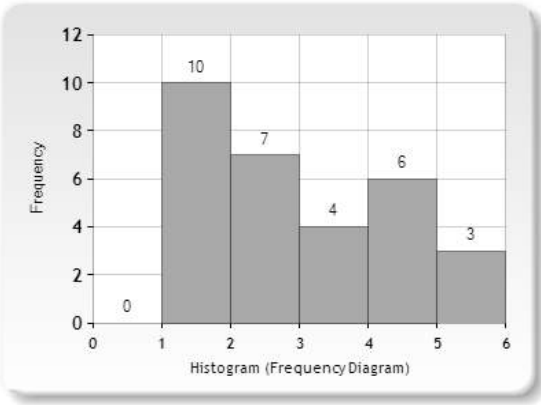
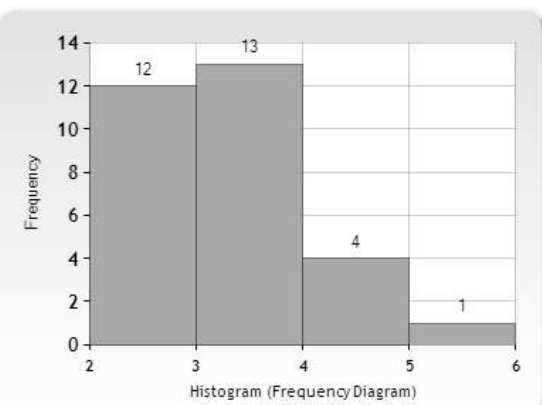
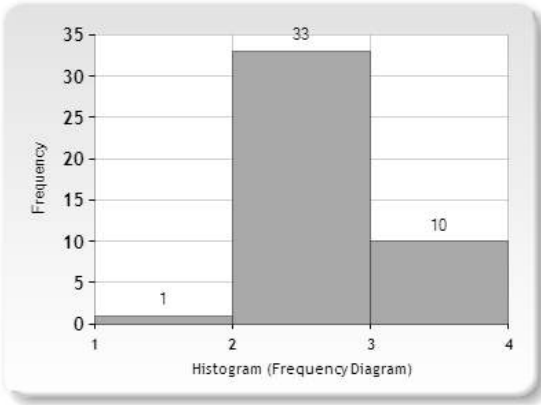
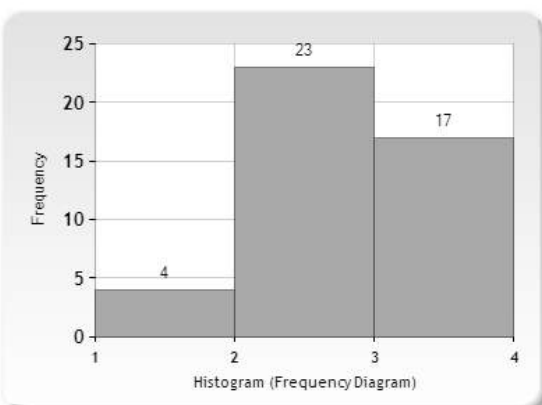
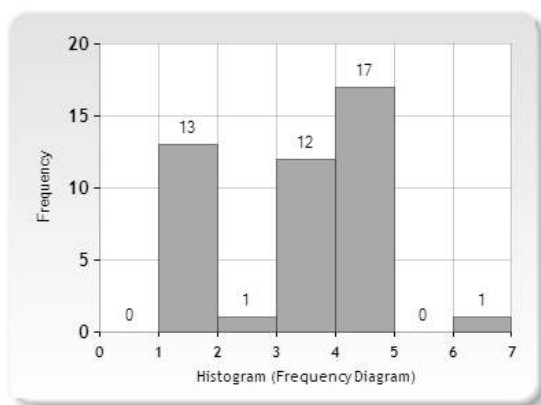
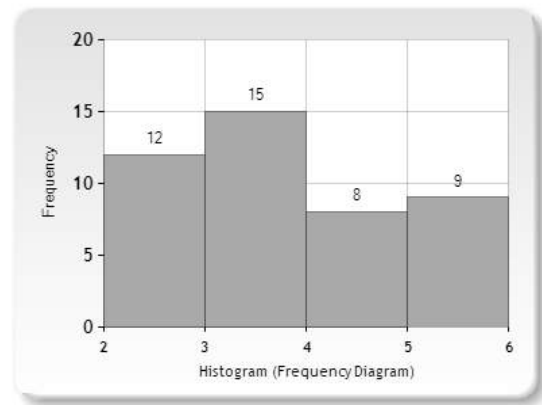
F4																									
Espaçamento	Continuidade																								
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	1	2	16	3	12	4	1	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	16	2	9	3	5						
Category	Frequency																								
1	1																								
2	16																								
3	12																								
4	1																								
Category	Frequency																								
1	16																								
2	9																								
3	5																								
Abertura	JRC																								
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	0	2	10	3	7	4	4	5	6	6	3	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	2	12	3	13	4	4	5	1
Category	Frequency																								
1	0																								
2	10																								
3	7																								
4	4																								
5	6																								
6	3																								
Category	Frequency																								
2	12																								
3	13																								
4	4																								
5	1																								

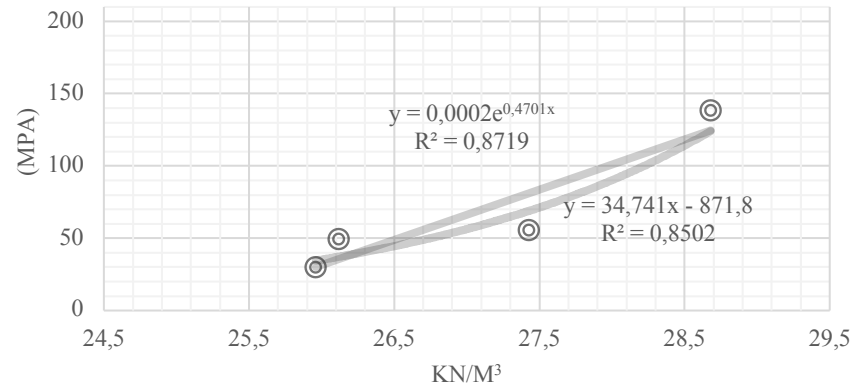
Tabela E.6 Histogramas de algumas características da família de descontinuidades F5

F5																											
Espaçamento	Continuidade																										
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	1	2	33	3	10	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>17</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	1	4	2	23	3	17										
Category	Frequency																										
1	1																										
2	33																										
3	10																										
Category	Frequency																										
1	4																										
2	23																										
3	17																										
Abertura	JRC																										
 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	0	0	1	13	2	1	3	12	4	17	5	0	6	1	 <p>Histogram (Frequency Diagram)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	Category	Frequency	2	12	3	15	4	8	5	9
Category	Frequency																										
0	0																										
1	13																										
2	1																										
3	12																										
4	17																										
5	0																										
6	1																										
Category	Frequency																										
2	12																										
3	15																										
4	8																										
5	9																										

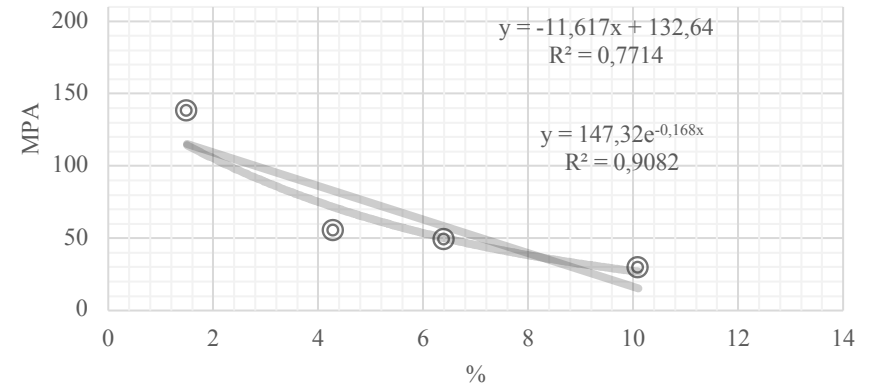
F. CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE PROPRIEDADES ÍNDICE

F.1 EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS

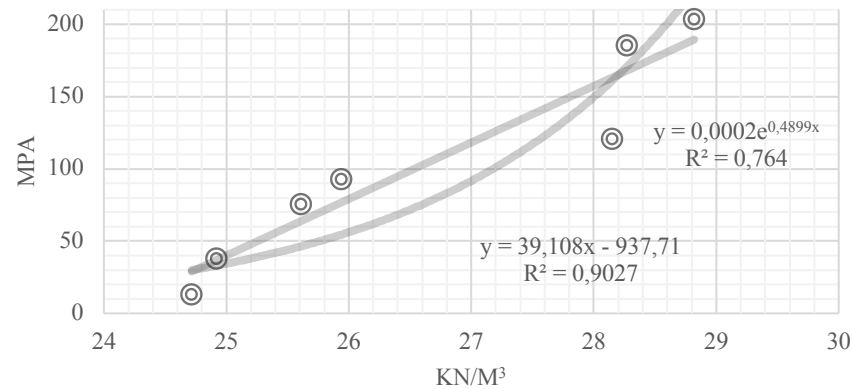
σ_c vs γ (valores médios)



σ_c vs n_e (valores médios)



σ_c vs γ (valores individuais)



σ_c vs n_e (valores individuais)

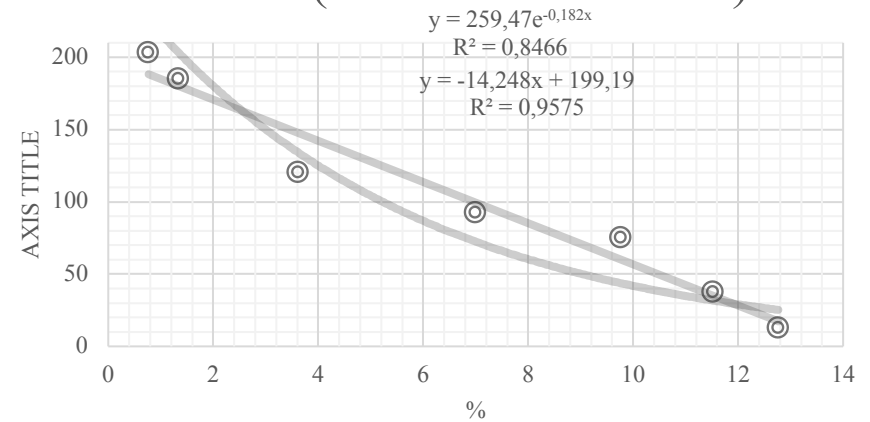
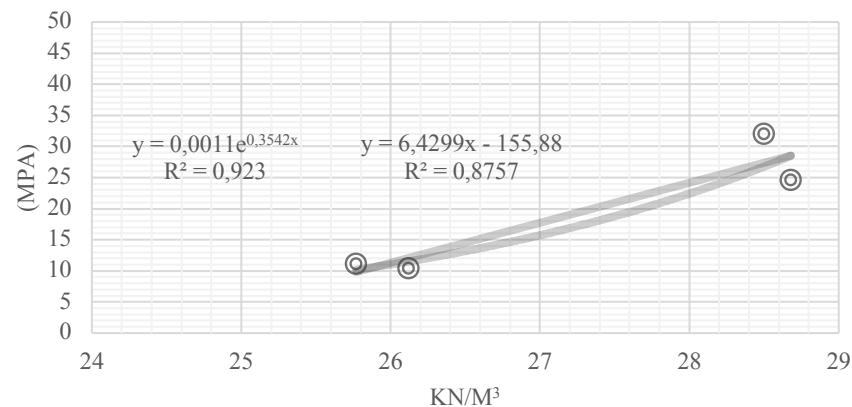
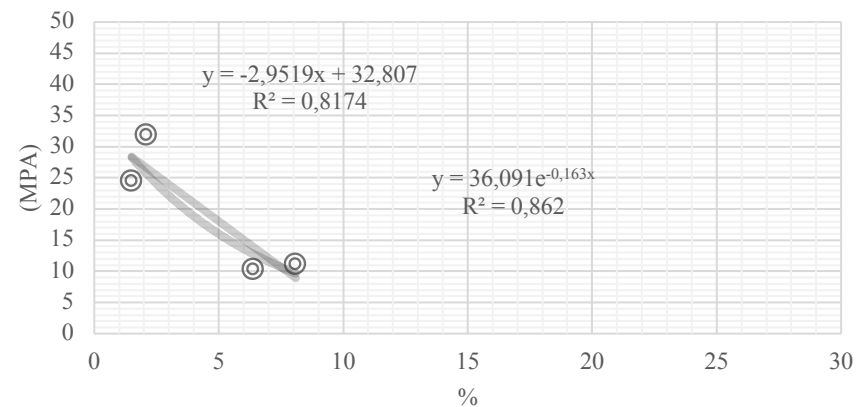


Figura F.1 Estimação da resistência à compressão uniaxial a partir de propriedades físicas

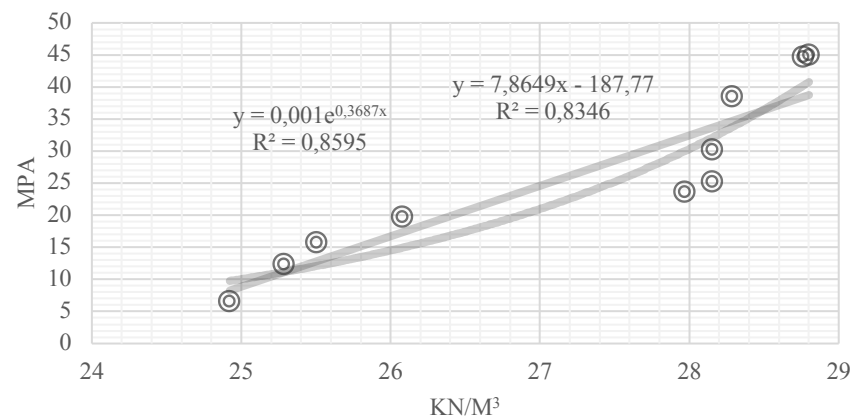
σ_t vs γ (valores médios)



σ_t vs n_e (valores médios)



σ_t vs γ (valores individuais)



σ_t vs n_e (valores individuais)

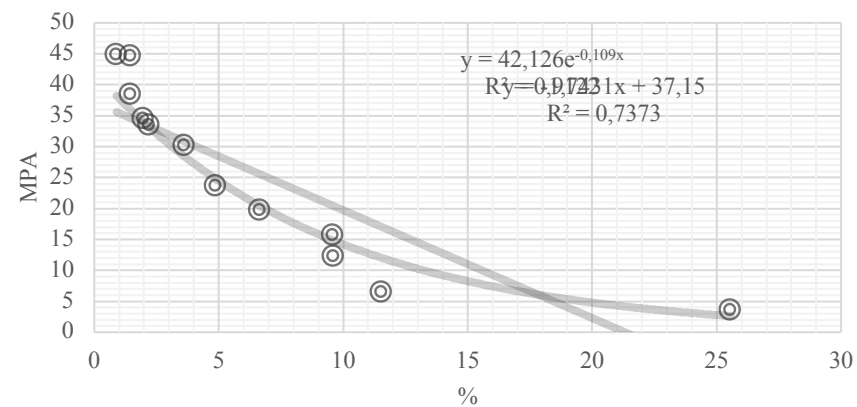
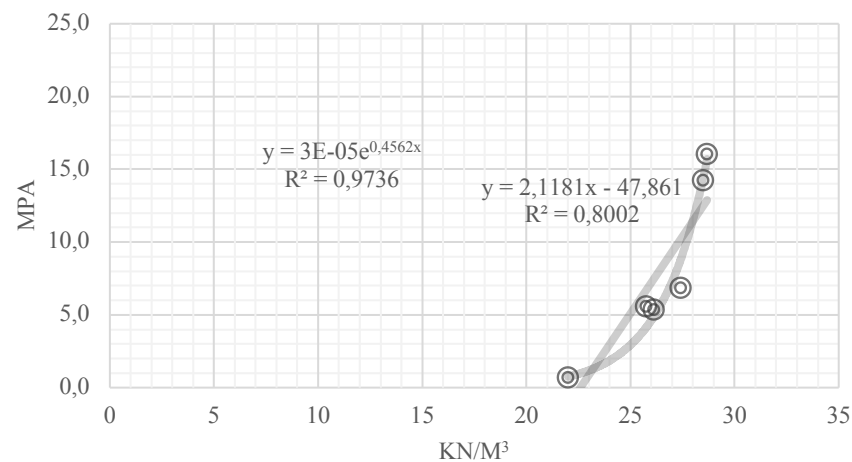
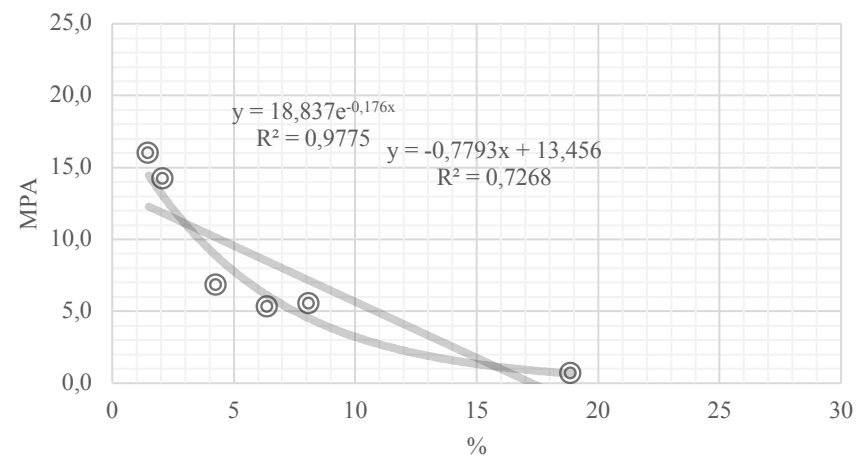


Figura F.2 Estimação da resistência à tracção indirecta a partir de propriedades físicas

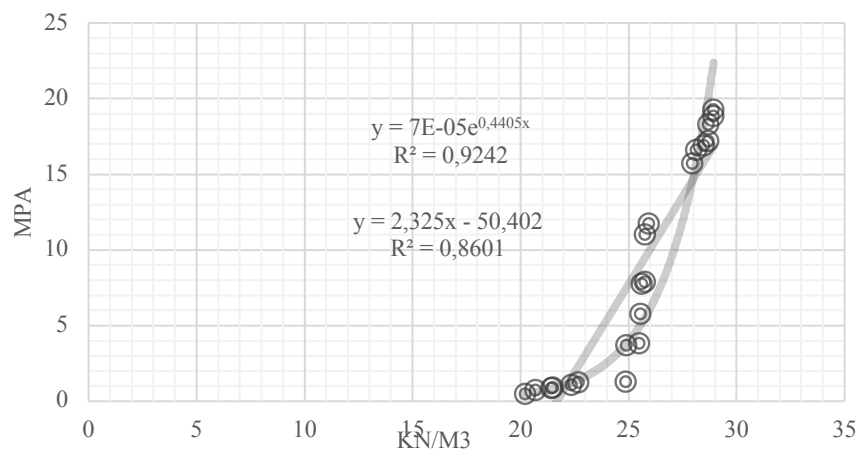
Is50 vs γ (valores médios)



Is50 vs ne (valores médios)



Is50 vs γ (valores individuais)



Is50 vs ne (valores individuais)

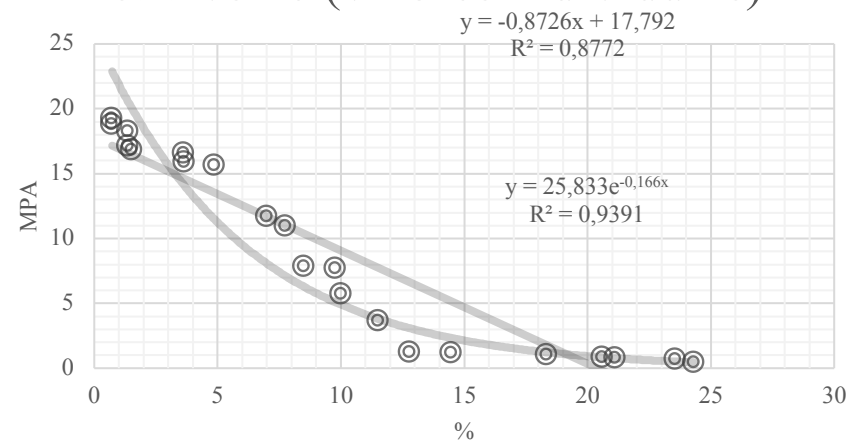


Figura F.3 Estimação da resistência à compressão pontual a partir de propriedades físicas

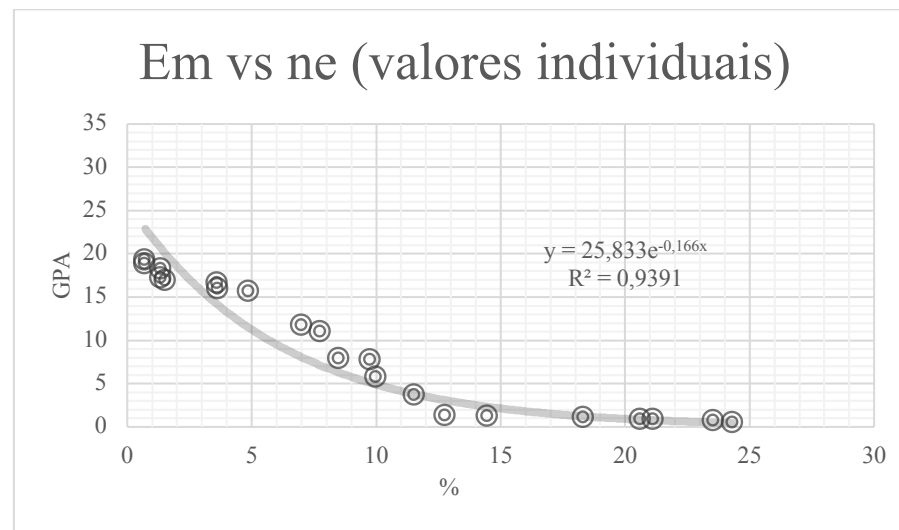
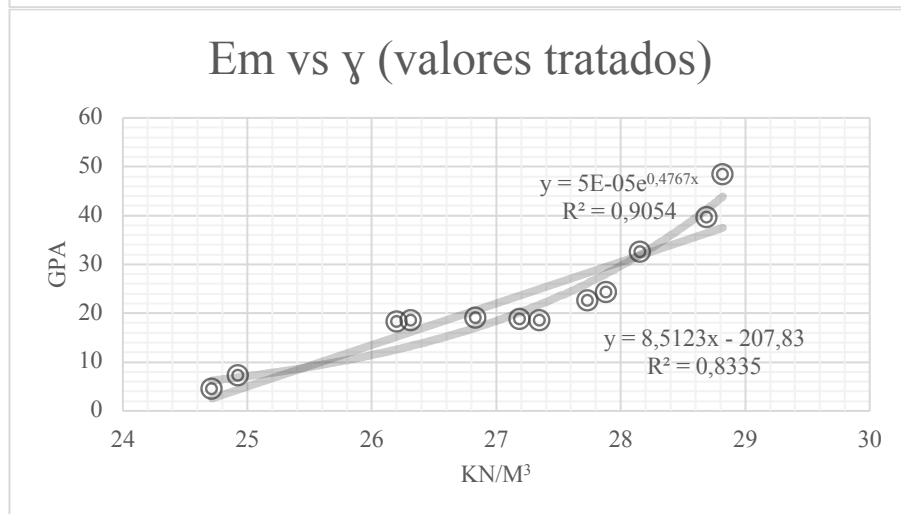
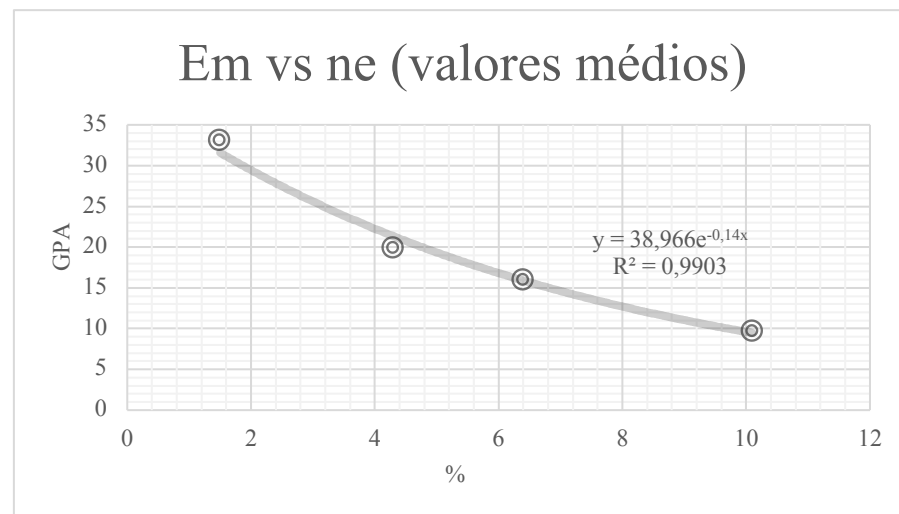
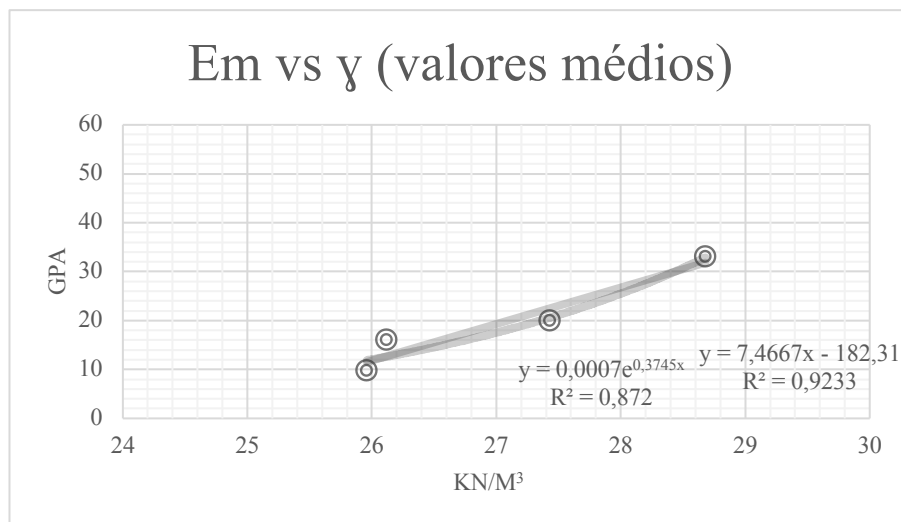


Figura F.4 Estimação do módulo de elasticidade estático a partir de propriedades físicas

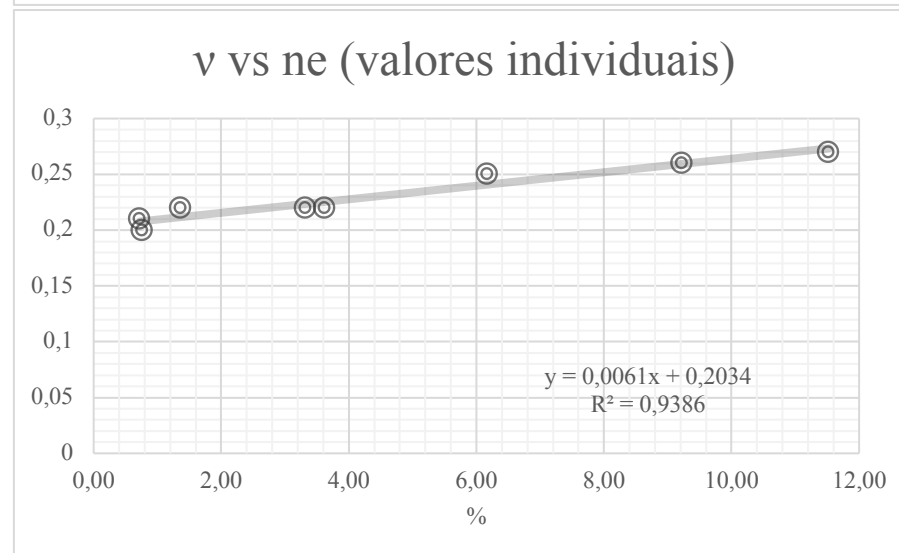
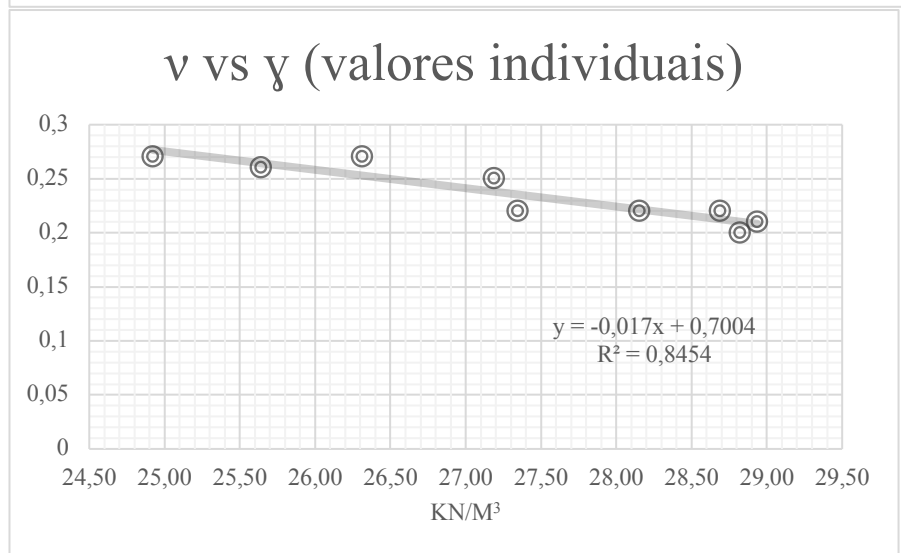
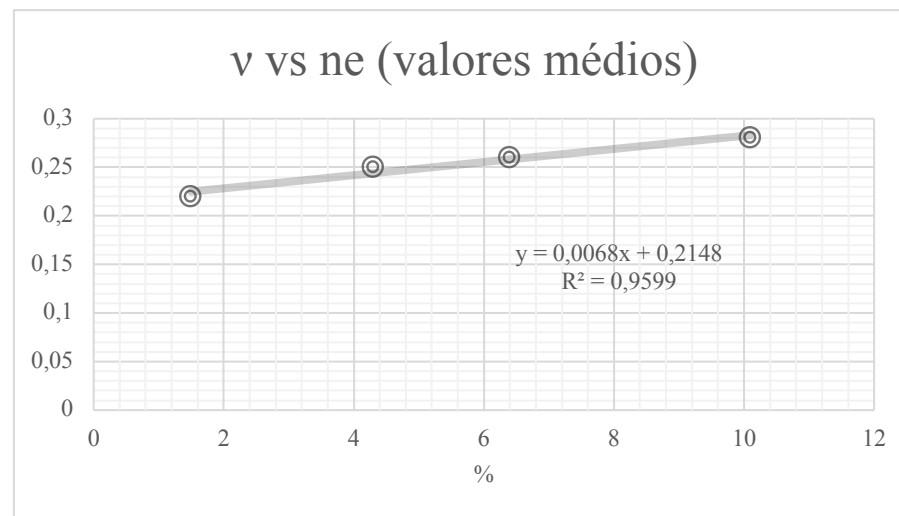
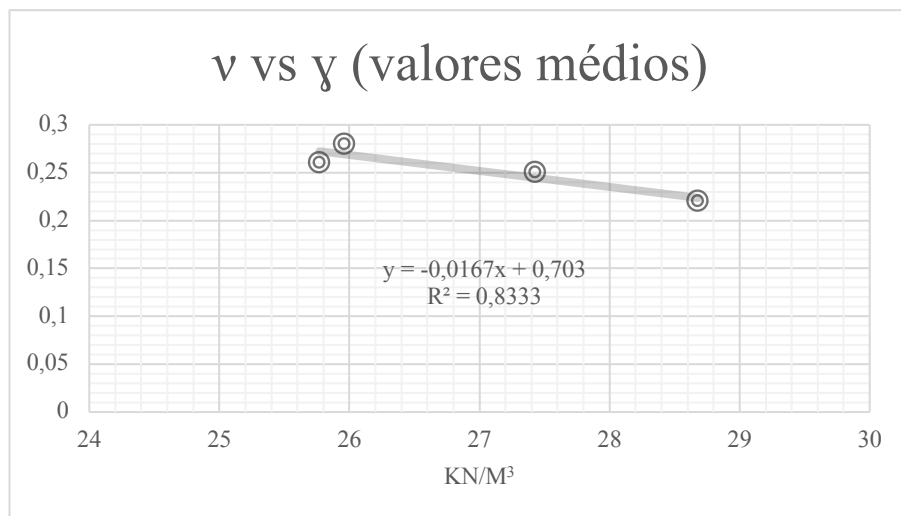
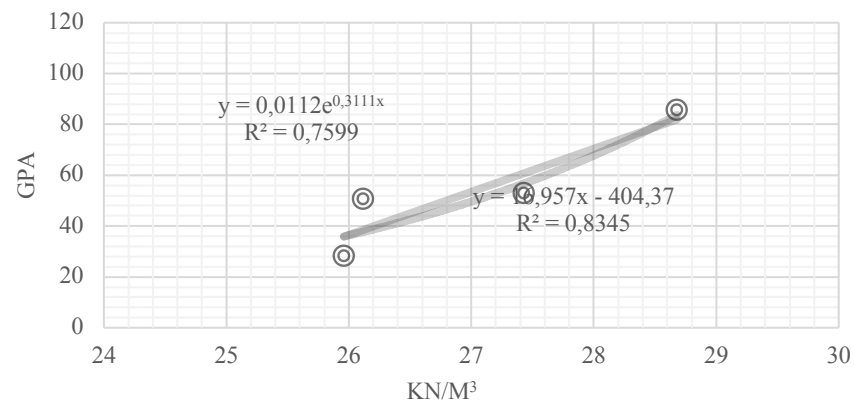
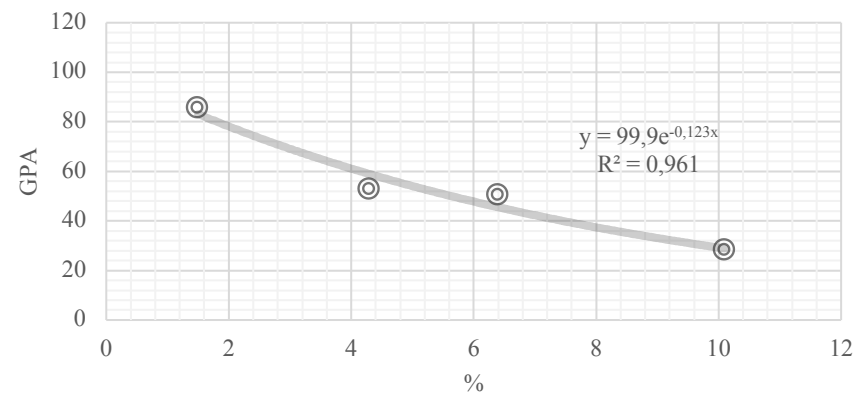


Figura F.5 Estimação do coeficiente de Poisson estático a partir de propriedades físicas

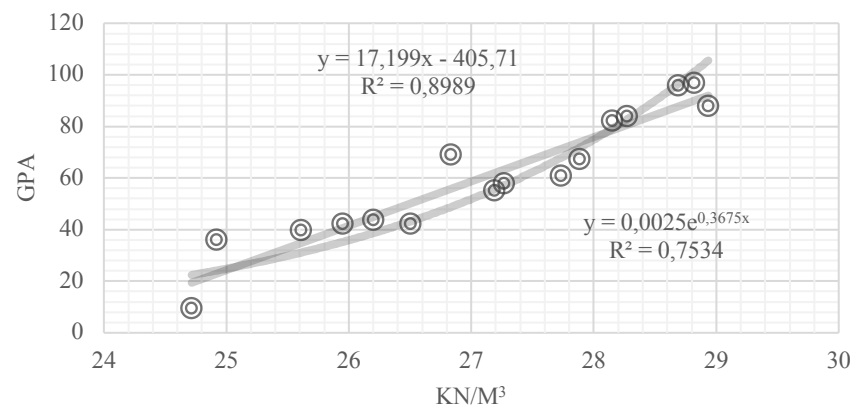
Ed vs γ (valores médios)



Ed vs ne (valores médios)



Ed vs γ (valores individuais)



Ed vs ne (valores individuais)

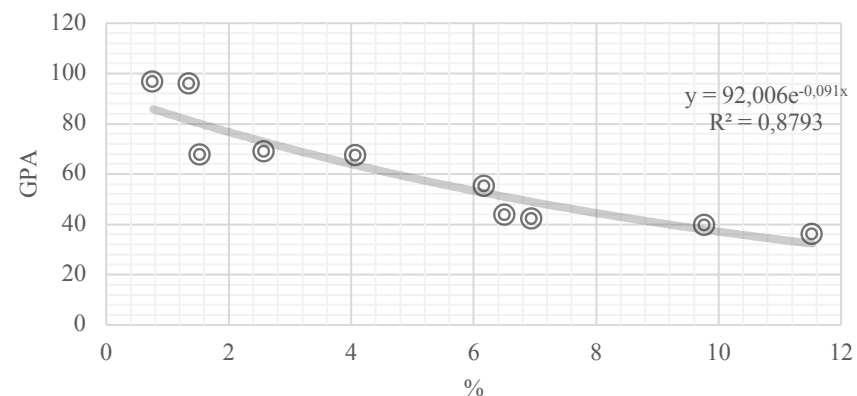
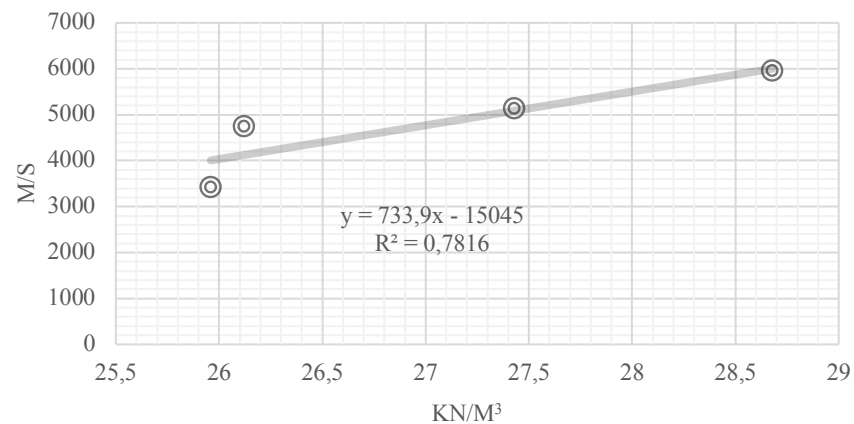
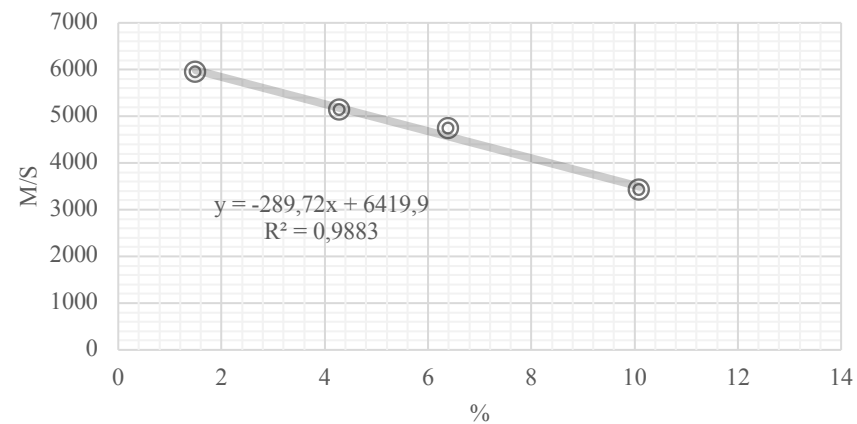


Figura F.6 Estimação do módulo de elasticidade dinâmico a partir de propriedades físicas

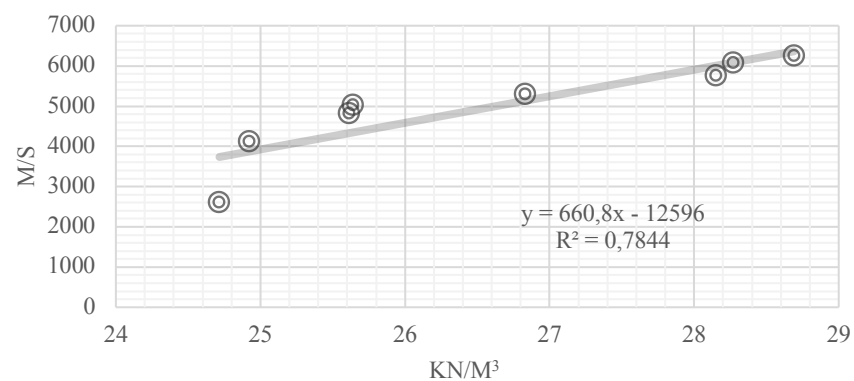
vp vs γ (valores médios)



vp vs ne (valores médios)



vp vs γ (valores individuais)



vp vs ne (valores individuais)

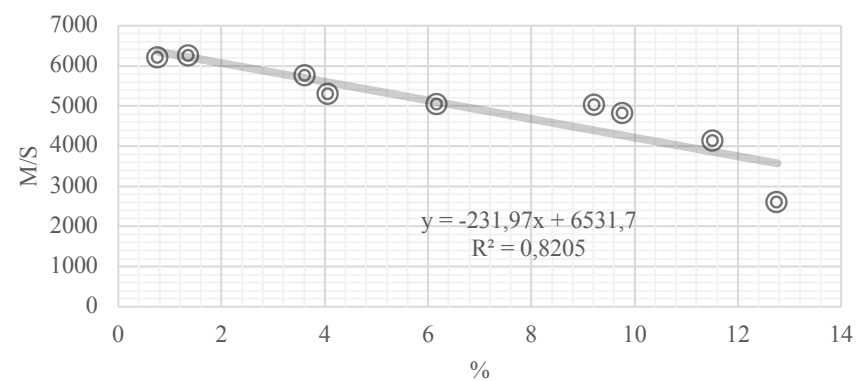


Figura F.7 Estimação da velocidade de propagação longitudinal a partir de propriedades físicas

F.2 EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

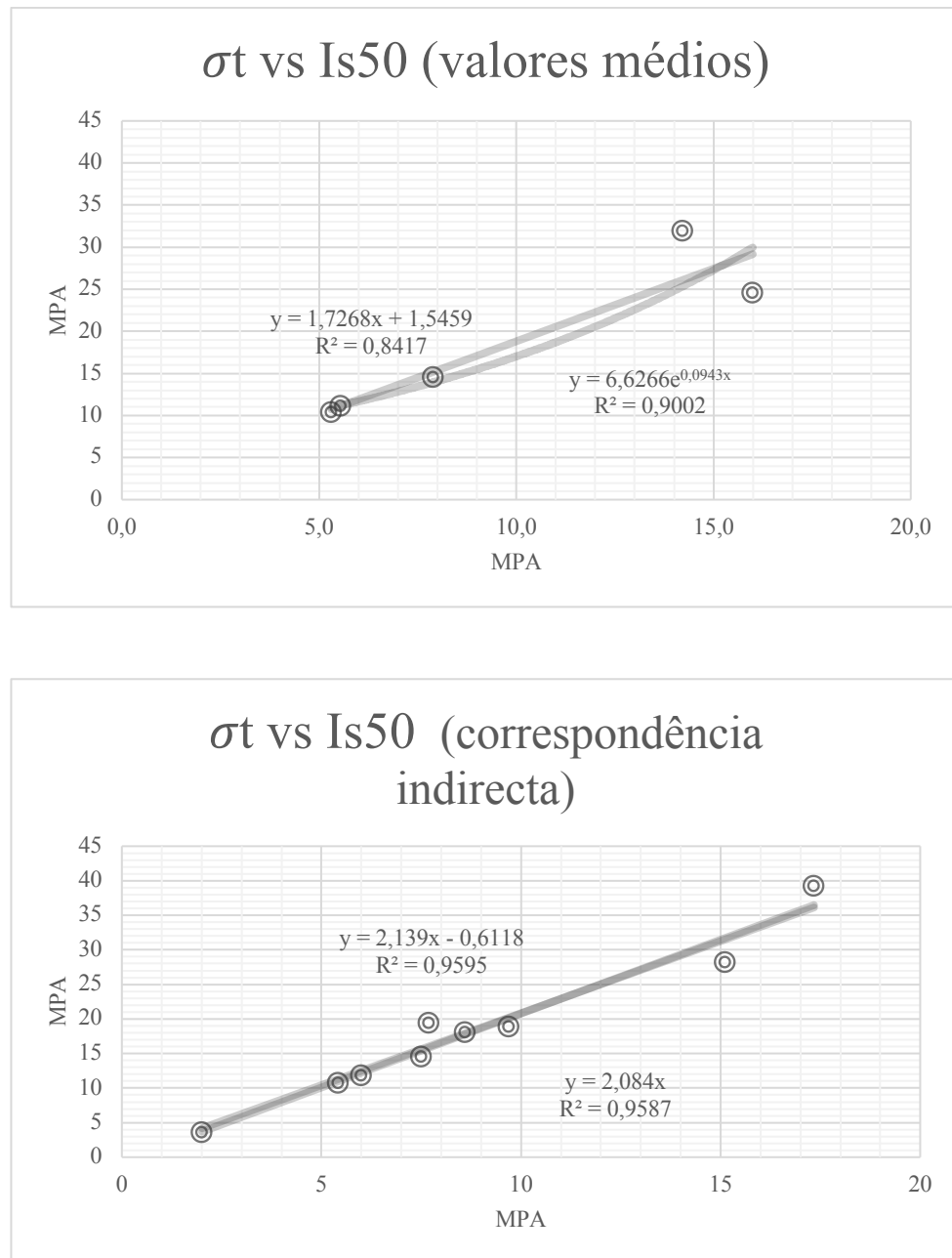


Figura F.8 Estimação da resistência à tracção indirecta a partir da resistência à compressão pontual

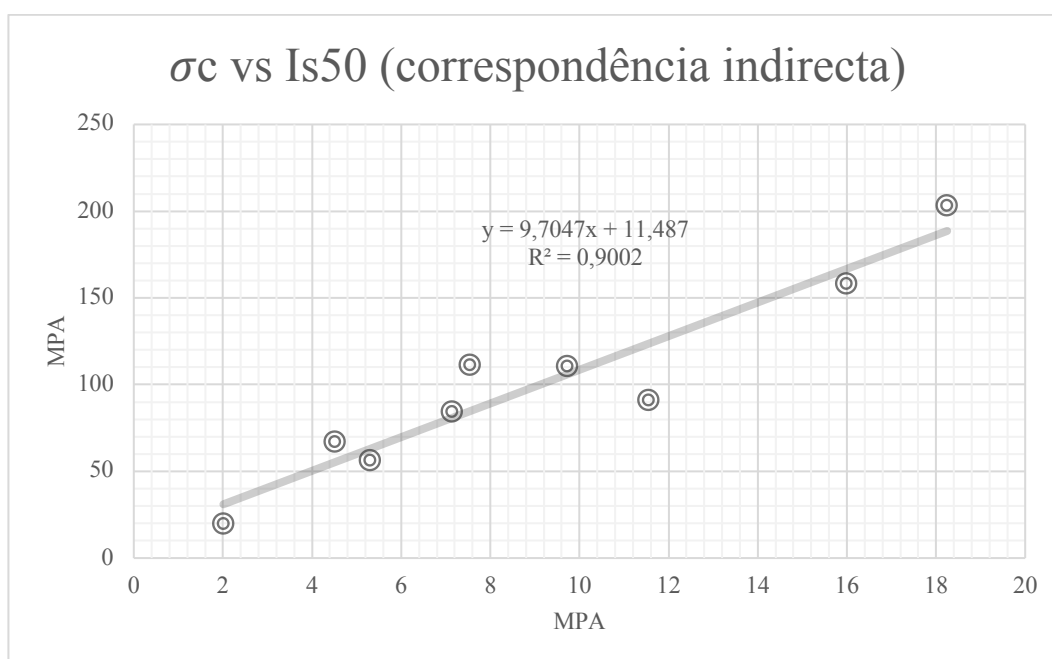
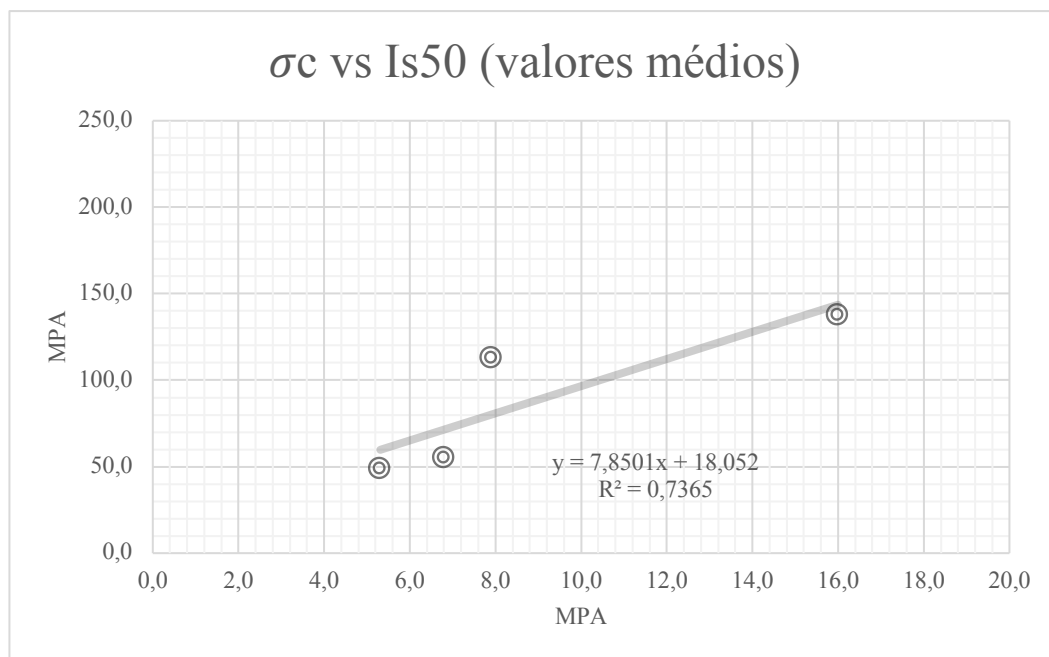


Figura F.9 Estimação da resistência à compressão uniaxial a partir da resistência à compressão pontual

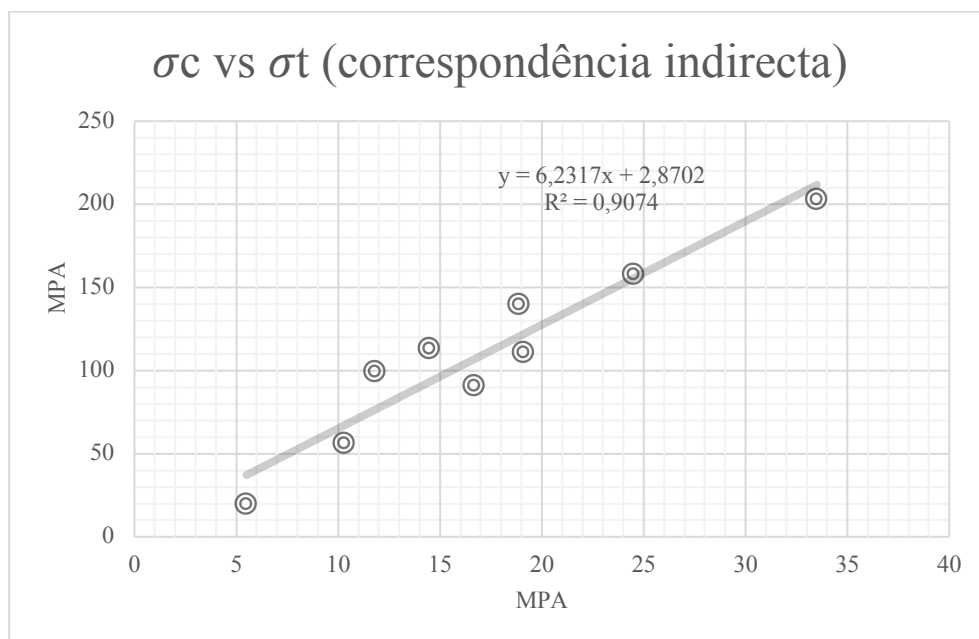
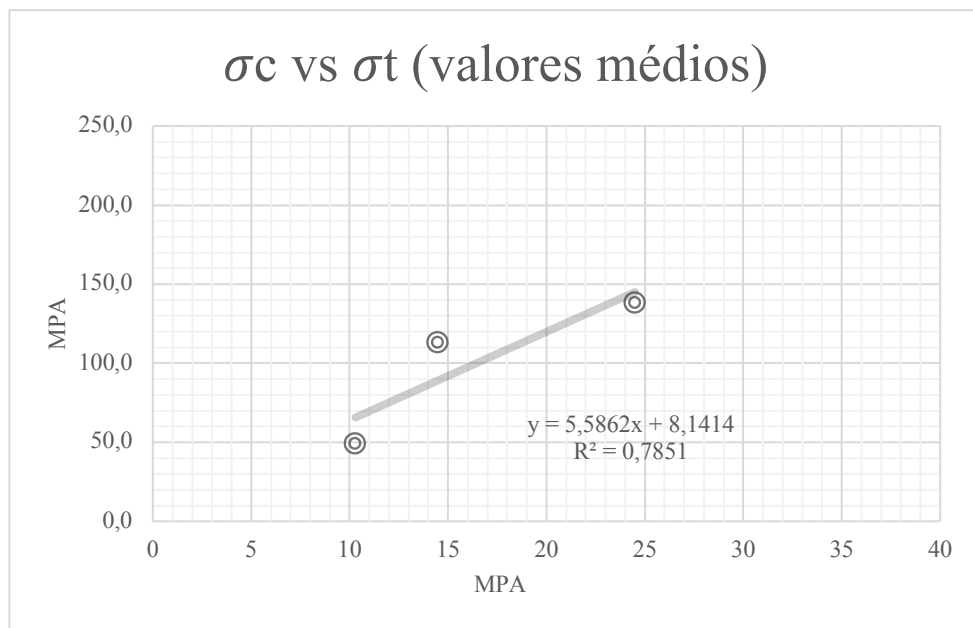


Figura F.10 Estimação da resistência à compressão uniaxial a partir da resistência à tracção (brasileiro)

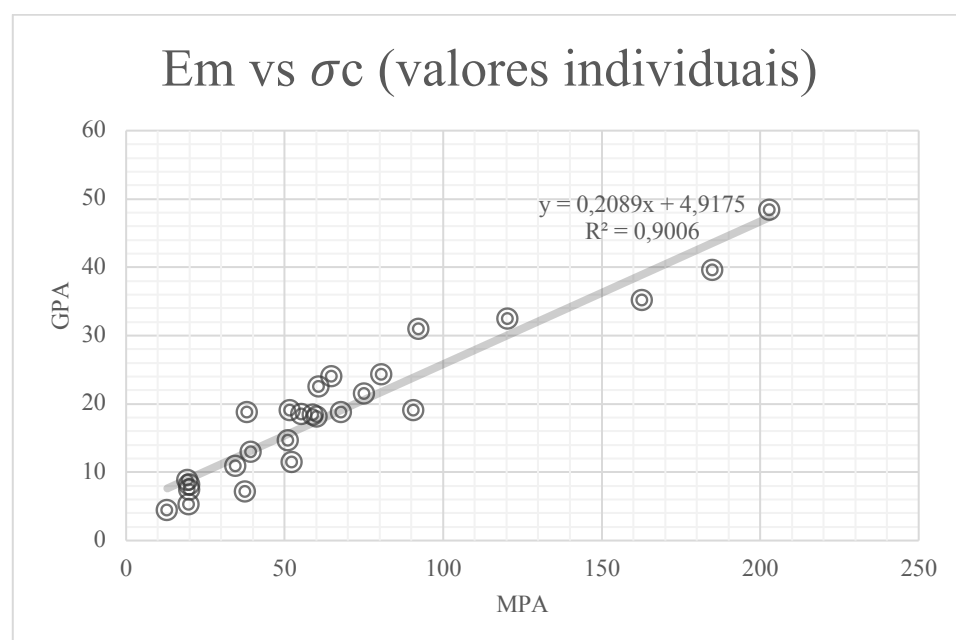
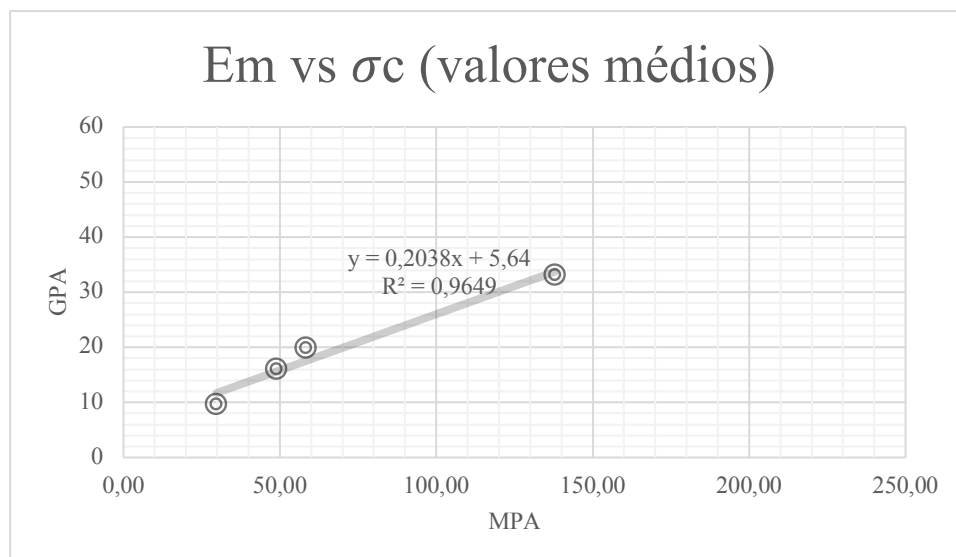


Figura F.11 Estimação do módulo de elasticidade estático a partir da resistência à compressão uniaxial

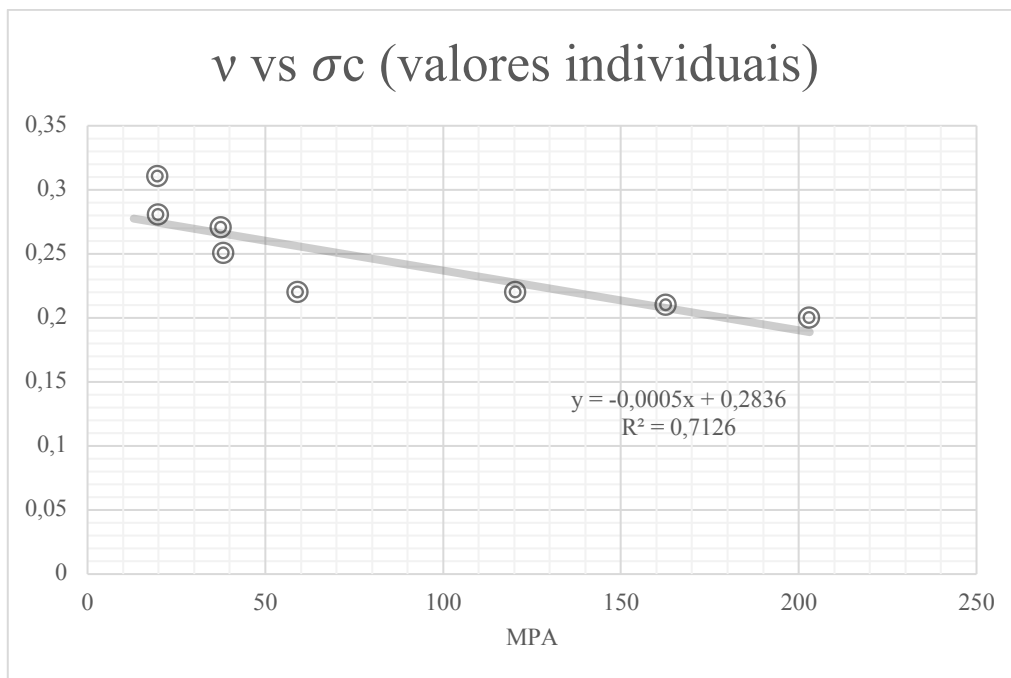
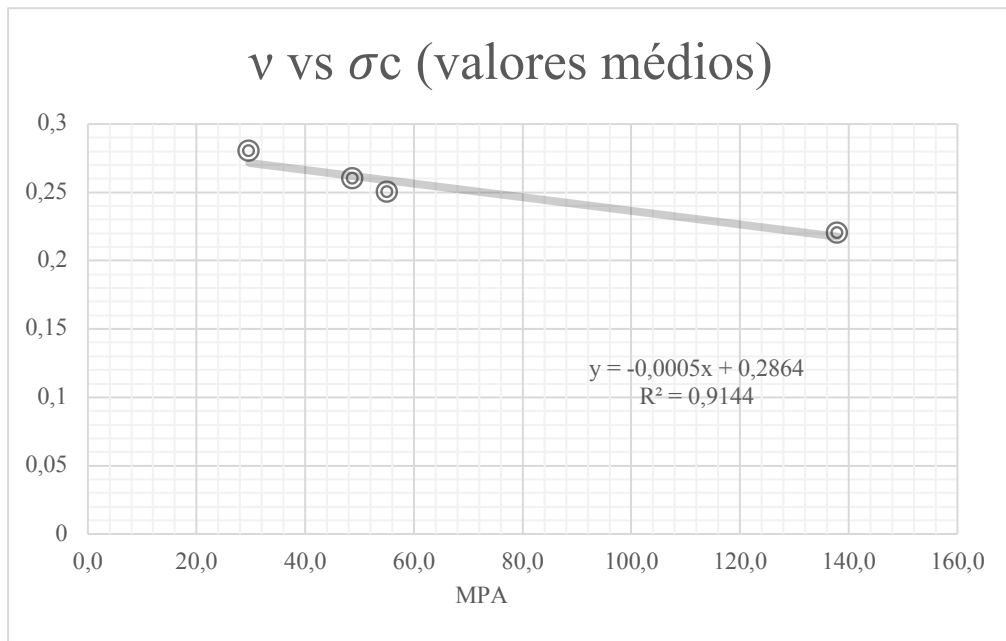


Figura F.12 Estimação do coeficiente de Poisson estático a partir da resistência à compressão uniaxial

F.3 EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES DINÂMICAS

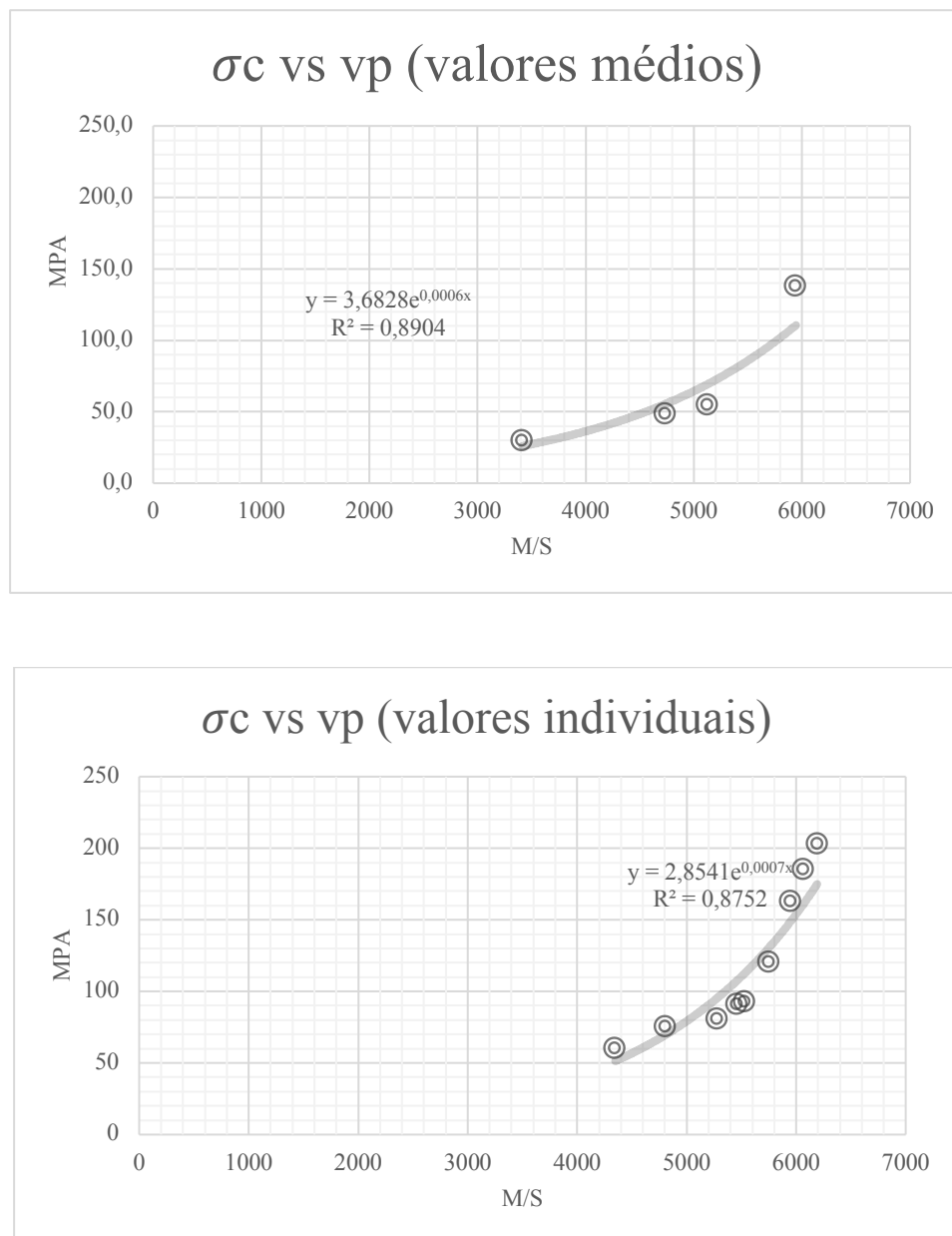


Figura F.13 Obtenção da resistência à compressão uniaxial a partir da velocidade de propagação longitudinal

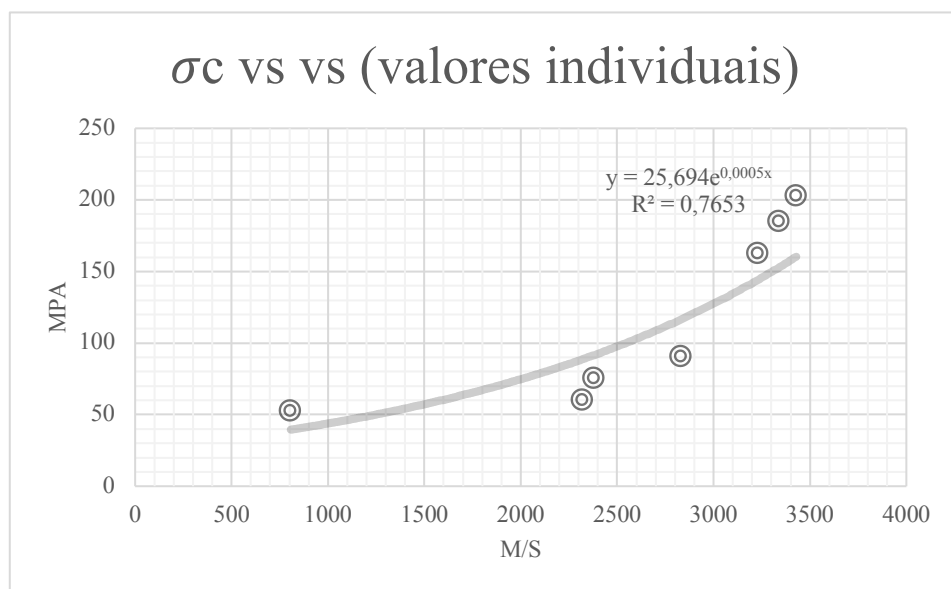
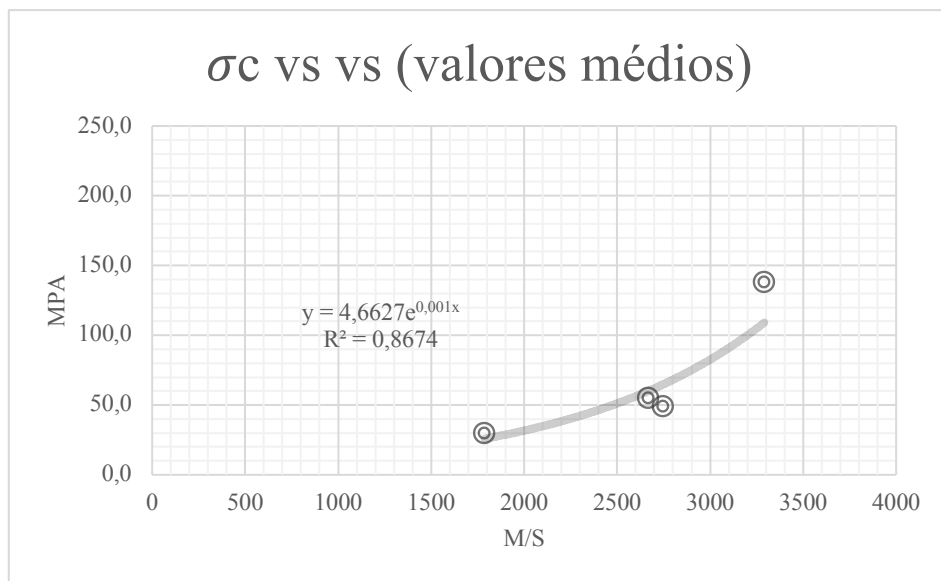


Figura F.14 Obtenção da resistência à compressão uniaxial a partir da velocidade de propagação transversal

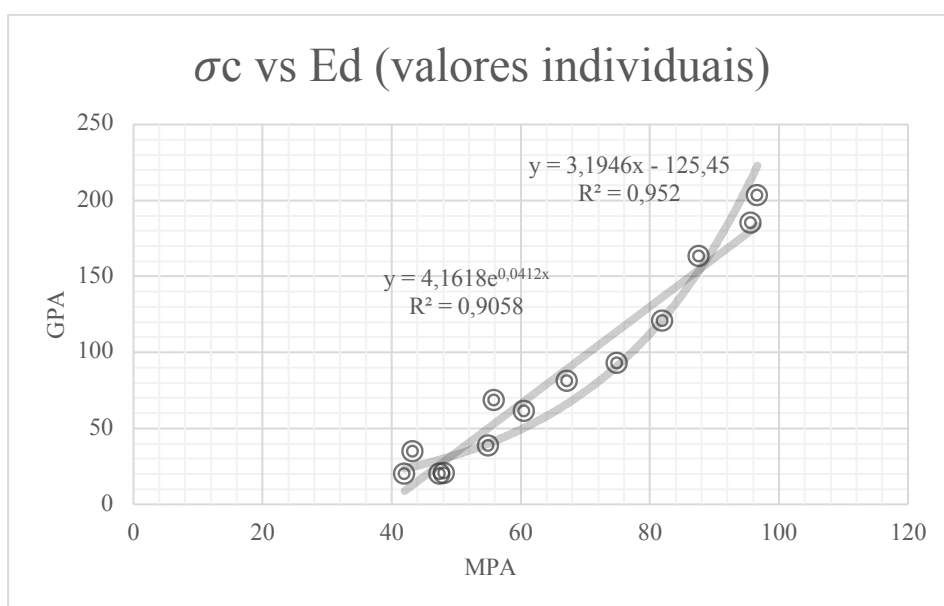
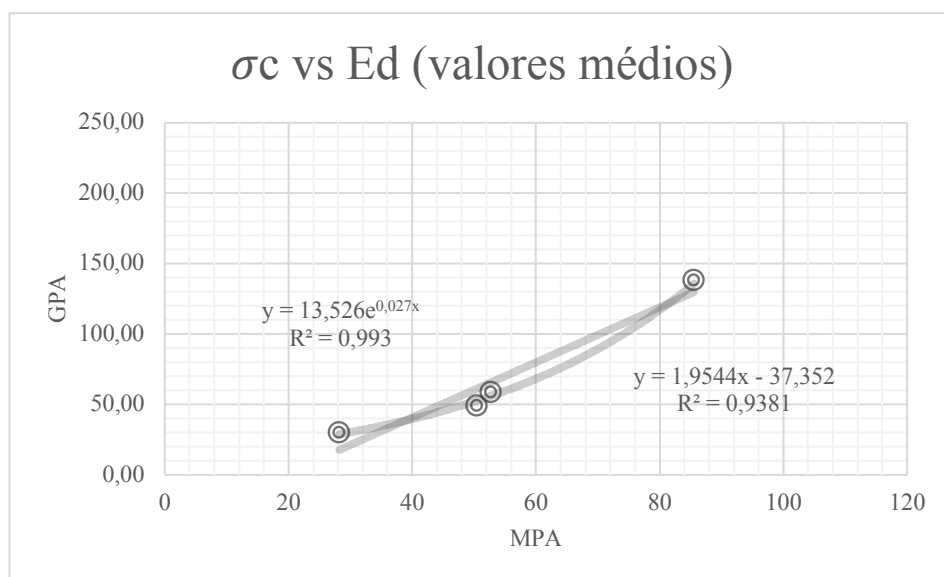


Figura F.15 Obtenção da resistência à compressão uniaxial a partir do módulo de elasticidade dinâmico

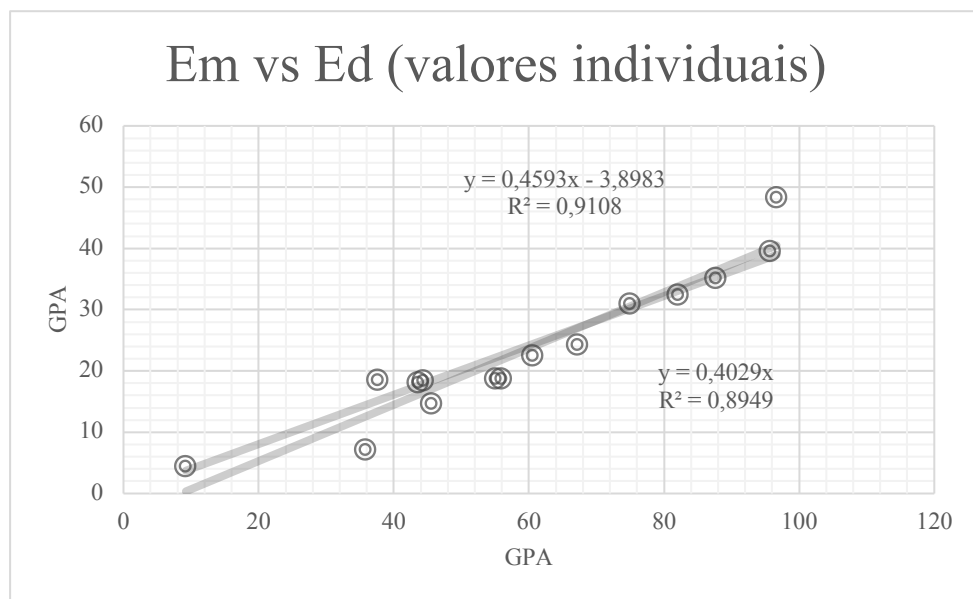
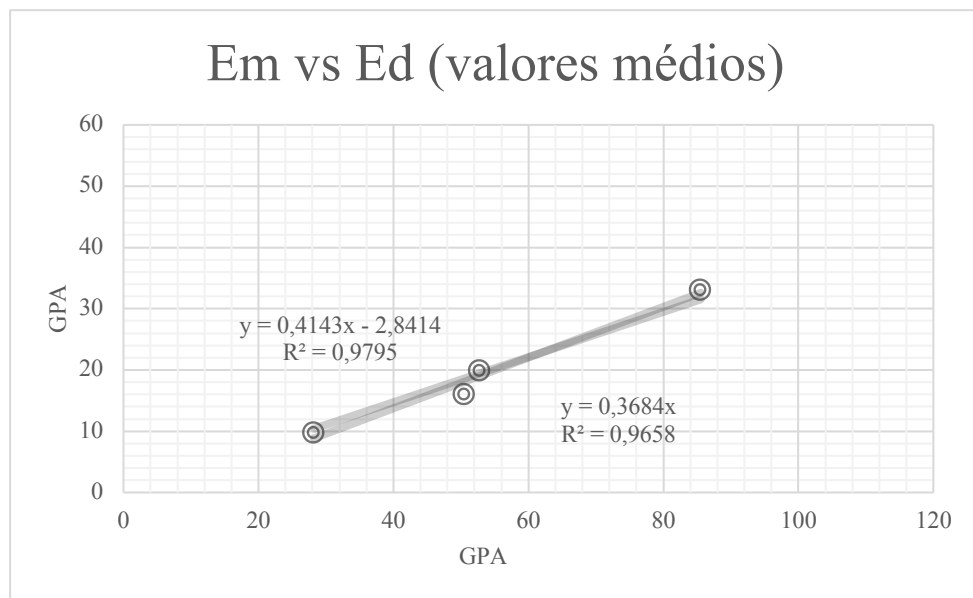


Figura F.16 Obtenção do módulo de elasticidade estático a partir do módulo de elasticidade dinâmico